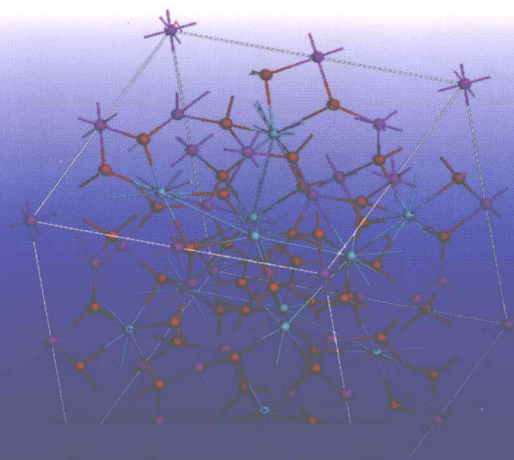


“十二五”国家重点图书出版规划项目

光学与光子学丛书

先进光功能透明陶瓷

潘裕柏 李江 姜本学 著



科学出版社

“十二五”国家重点图书出版规划项目

光学与光子学丛书

先进光功能透明陶瓷

潘裕柏 李 江 姜本学 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

光功能透明陶瓷(主要包括激光陶瓷和闪烁陶瓷)是目前陶瓷研究的热点之一,也是材料结构功能一体化的成功典范。在先进陶瓷领域,光功能陶瓷对化学组成、相结构、制备工艺及性能的要求最为苛刻。在一定程度上,光功能陶瓷的制备工艺技术水平代表了先进陶瓷研究领域的最高水平。本书聚焦光功能透明陶瓷这一热点领域,系统、完整地介绍了中国科学院上海硅酸盐研究所透明与光功能陶瓷课题组过去十多年来在光功能透明陶瓷领域取得的研究成果,以及国内外学者近年来在该领域所取得的进展。

本书适合材料及相关专业的高年级本科生、研究生和从事材料研究的科学技术人员系统学习或参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

先进光功能透明陶瓷/潘裕柏,李江,姜本学著. —北京:科学出版社,2013
(光学与光子学丛书)

“十二五”国家重点图书出版规划项目

ISBN 978-7-03-037952-8

I. ①先… II. ①潘… ②李… ③姜… III. 透明陶瓷-研究
IV. ①TQ174.75

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 135447 号

责任编辑:钱俊 鲁永芳/责任校对:彭涛
责任印制:钱玉芬/封面设计:耕者设计工作室

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>

北京通州皇家印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2013年6月第一版 开本:B5(720×1000)

2013年6月第一次印刷 印张:23 1/4

字数:454 000

定价:98.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

丛 书 序

长期以来,我一直想组织同行出一套适合于光学、光学工程工作者和研究人员需求的光学与光子学的丛书。如今,在科学出版社同志们的努力推进和工作在光学与光子学科研、教学一线的广大专家们的大力支持下,这样一个愿望终于得以实现,这使我感到由衷的欣慰和喜悦,我深信这样一套丛书的出版必将有效地促进我国光学、光电子以及光学工程技术的创新发展。

当今世界科学技术发展日新月异。科技创新能力已成为一个地区、一个国家,尤其是一个大国经济和社会发展的核心竞争力。在众多纷繁的科技领域中,光学与光子学的发展直接影响到其他诸多学科领域的发展及其可能取得的成就。不但物理学、化学、生命科学、天文学等基础科学的发展离不开光学与光子学,对现代人类社会和人类生活影响甚大的一些技术科学,如照明、通信、洁净能源、遥感、显示、环境监测、国防和空间开发、医疗与诊断、先进制造等,都需要光学与光子学的知识。光学与光子学是渗透到各个学科领域内的前沿科学,光学与光子学涉及几乎所有技术前沿的核心技术。中华民族要真正走向繁荣昌盛离不开对光的驾驭。

编委会把丛书的名称定为《光学与光子学丛书》,是想以此既包含经典光学(classical optics)的精华,也容纳现代光学(modern optics)即光子学(photonics)的最新研究进展。我和所有编委们一同期待着这套丛书能够在涉及光科学和光学技术知识的深度和广度上都达到一个崭新的高度。积跬步至千里,汇小溪成江河。改革开放三十年的成就使得我国的光学事业处在了一个新的起点上。让我们大家共同努力,以此套高质量、高水准的《光学与光子学丛书》作为对中国光学事业大发展的鼎力贡献。

母国光

2011年1月

前 言

人类自古以来与光相伴,光谱成分丰富齐全的太阳光,是地球上一切生命的源泉,是人类健康的真正保证,人体的免疫功能只有经过太阳光的适当照射才能完整、健全和得以正常发挥。随着认识与科技的发展,人类也从被动地接受阳光到利用阳光,从远古时代把火作为直接信号使用,发展到现在以玻璃的“透明性”为基础特性研制的光纤作为介质实现远距离信息网络的构建。21 世纪,将以光子形式产生的光子计算机为开端,以光为媒,进入融合所有科学技术的时代。考虑到这样的时代背景,产生光并利用光与光之间相互作用的科学技术,以及支持其后的光功能陶瓷材料的开发就显得至关重要。各种光功能材料的发现与发展也将促进激光技术与光电子技术等的发展。

目前市场上的透明光功能材料还是以单晶与玻璃为主。作为现代材料领域最新发展的先进光功能透明陶瓷,不但具有陶瓷材料的特性,而且在制备成本、尺寸(与单晶相比)、光功能效应、力学性能,以及热性能(与玻璃相比)方面具有优势,尤其是可以运用复合材料的设计原则制备出复合与集成的光功能陶瓷,这将为光功能系统设计提供无可比拟的灵活性。透明陶瓷不仅具有优异的透光性,其作为陶瓷所具有的高强度、高硬度、高透明度、耐腐蚀、耐高温等性能远优于一般光学材料,用它可以制成各种用途的电-光、电-机军民两用器件,在节能、医学、激光、检测、勘探等方面有广泛的应用前景,已经得到世界各国的极大重视,发达国家正逐步加大研究投入。各学科之间、学科与工艺技术之间的相互作用与渗透,对无机光功能材料的发展将产生深远的影响,学科交叉使结构-功能以及各种材料之间的界限变得模糊,复合材料的设计理念将使光功能透明陶瓷在结构复合与组分复合方面通过协同作用获得最佳性能以及开发出新的功能。

本书重点介绍光功能透明陶瓷的两个主要应用:激光与闪烁陶瓷,具体包括材料的一些基本性能、制备方法、表征技术、应用,以及中国科学院上海硅酸盐研究所在此领域的一些研究成果等方面。由于作者的知识水平有限,疏漏与不妥之处在所难免,敬请读者批评指正。

本书是中国科学院上海硅酸盐研究所透明与光功能陶瓷课题组全体人员辛勤劳动的结晶,感谢所有课题组的工作人员、学生、曾经在课题组工作和学习的成员,由

目 录

前言

第1章 绪论	1
1.1 透明陶瓷的定义	1
1.2 透明陶瓷的特征	2
1.3 透明光功能陶瓷的分类	4
1.4 固体激光技术概述	5
1.4.1 激光技术的发展简史	5
1.4.2 实现高功率固体激光的技术途径	8
1.4.3 固体激光器的工业应用	11
1.4.4 固体激光器对工作物质的要求	12
1.4.5 固体激光器的发展趋势	13
1.5 激光陶瓷概述	13
1.5.1 透明陶瓷作为激光介质的可能性	13
1.5.2 透明陶瓷的理论基础	14
1.5.3 透明陶瓷作为激光介质的优点	15
1.5.4 激光陶瓷的发展历史及研究进展	16
1.6 闪烁陶瓷概述	24
1.6.1 闪烁体的应用要求	24
1.6.2 新型闪烁体的寻找方法	26
1.6.3 闪烁陶瓷的发展历史及研究进展	27
参考文献	28
第2章 光功能透明陶瓷的分类	38
2.1 激光、闪烁材料的定义与作用	38
2.1.1 激光原理	38
2.1.2 闪烁机理	39
2.2 能谱	40
2.2.1 激光离子能级简介	40
2.2.2 几种具体的激光离子: f-f 跃迁光谱	45
2.2.3 闪烁材料: $4f^n$ 组态和 $4f^{n-1}5d$	52
2.3 光功能陶瓷材料体系	54

2.3.1 高对称体系材料	57
2.3.2 非对称体系材料	63
参考文献	64
第3章 光功能透明陶瓷的制备与表征	67
3.1 光功能透明陶瓷的制备与微结构	67
3.1.1 钇铝石榴石基透明陶瓷的制备与微结构	67
3.1.2 倍半氧化物透明陶瓷的制备与微结构	112
3.1.3 Tm^{2+} : II~VI 族中红外激光材料的制备	155
3.1.4 非对称体系光学透明陶瓷	157
3.2 光功能透明陶瓷的性能	174
3.2.1 光功能透明陶瓷的光学散射损耗	174
3.2.2 激光陶瓷的力学性能	188
3.2.3 激光陶瓷的热性能	195
3.2.4 同质氧化物透明陶瓷的激光性能	202
3.2.5 复合结构透明陶瓷的激光性能	269
3.2.6 TM^{2+} : II~VI 族材料的中红外激光性能	286
3.2.7 光功能透明陶瓷的激光诱导损伤	293
3.2.8 闪烁陶瓷的测试表征和光物理特性	302
参考文献	309
第4章 光功能透明陶瓷的应用	327
4.1 高功率固体激光器中的应用	327
4.2 核聚变点火装置中的应用	330
4.3 核医学成像中的应用	333
4.4 安全检测中的应用	336
参考文献	338
第5章 光功能透明陶瓷的展望	340
5.1 第一性原理计算在闪烁材料中的应用	340
5.1.1 计算材料学简介	340
5.1.2 闪烁材料缺陷的计算	342
5.1.3 探索新型闪烁材料	347
5.2 新材料与新工艺的探索	349
5.2.1 低对称体系透明陶瓷的探索	349
5.2.2 多晶透明陶瓷的单晶化制备	351
5.3 透明陶瓷其他功能特性的开发	354
参考文献	355
索引	358

第 1 章 绪 论

1.1 透明陶瓷的定义

一般来说,陶瓷和玻璃、水泥、单晶并称为工业中常用的四大类无机材料,它们的属性各有不同。陶瓷材料的热稳定性、耐腐蚀和耐磨损等方面的性能通常优于金属,可以承受金属材料和高分子材料难以胜任的严酷的工作环境,常常成为某些新兴科学技术得以实现的关键。此外,对于材料而言,原料的价格也是不可忽视的因素,由于陶瓷材料的原料蕴藏相当丰富,在资源利用上的限制比特殊金属少得多,所以陶瓷材料具有极高的附加值。但是由于硬度高、脆性大等特点,陶瓷材料制备后必须加工成符合形状的工件才能使用,所以一般而言陶瓷块体材料无法像易加工的聚合物或金属材料那样成吨出售。传统陶瓷不透明的原因是其内部存在有较大尺寸的晶粒、玻璃相、气孔等多组分异相结构及杂质,由于这些相区折射率不同(这些区域的物性不同导致其折射率不同),当光线通过时在微区界面上将发生频繁的反射、散射、折射、吸收等,特别是大量微气孔的存在,使反射、散射、折射现象更为严重,几乎没有光线能够按原有路径通过该陶瓷,故呈不透明状态。20 世纪 50 年代末,美国 GE 公司的 Coble 博士成功研制出透明 Al_2O_3 陶瓷——Lucalox(商品名称)从而一举打破了人们的传统观念。

当初透明陶瓷被定义为无机粉末经过烧结使之具有一定透明度的陶瓷材料。当把这类材料抛光成 1mm 厚放在带有文字的纸上通过它可读出内容,即相当于透光率大于 40 %^[1]。

透明氧化物陶瓷目前已被广泛用作高温仪器的光学零件,如高温窗材、红外透过窗材、高温透镜等,还被广泛用作高压钠灯的灯管、特种灯泡。透明 $(\text{Pb},\text{La})(\text{Zr},\text{Ti})\text{O}_3$ (PLZT)陶瓷等也被广泛用作新型的电光材料,如光记忆元件、录相显示和存储系统、光调制元件、光阀及光快门等。表 1.1~表 1.3 列出了几种透明陶瓷材料的主要工艺及性质^[2,3]。

表 1.1 透明陶瓷及其应用

透明陶瓷	主要特性	主要的用途
Al_2O_3 、 MgO 、 $2\text{Al}_2\text{O}_3\text{-MgO}$ 、 Y_2O_3	透明性与 耐腐蚀性	高压钠灯 及化工窗材

续表

透明陶瓷	主要特性	主要的用途
MgO、Y ₂ O ₃ 、 ThO ₂ -5Y ₂ O ₃	透明性与 耐高温性	高温窗材、高折射率透镜 及红外透过窗材
(Pb,La)(Zr,Ti)O ₃ 、 (Pb,Sr)(Zr,Ti)O ₃ 、 (Pb,La)(Hf,Ti)O ₃ 、 (Sr,Ba)Nb ₂ O ₆ 、LiTaO ₂	电光效应	光记忆元件、 录相显示和储存系统、 光调制元件、光偏向元件、 光快门、光信息处理系统

表 1.2 氧化物透明陶瓷的某些性能

透明陶瓷种类	添加剂	晶系	熔点/℃	薄片透过率/%	光波长/ μm	薄片厚度/mm
Al ₂ O ₃	0.25 wt% MgO	六方	2050	40~60	0.3~2	1
BeO	—	六方	2520	55~60	0.4~3	0.8
CaO	~0.4 wt%CaF ₂	立方	~2500	40~70	0.4~8	1.25
MgO	1 wt%LiF	立方	2800	80~85	1~7	5
ThO ₂	2 mol%CaO	立方	~3000	50~70	0.4~7	1.5
Y ₂ O ₃	10 mol% ThO ₂	立方	~2400	>60	0.3~8	0.76
ZnO	1 wt%Gd	六方	~1975	60	可见光	0.5
ZrO ₂	6 mol% Y ₂ O ₃	立方	~2700	~10	可见光	1.0

wt%: 质量百分比; mol%: 摩尔百分比

表 1.3 几种透明陶瓷材料的主要工艺及性质

材料	制备条件		晶系	透射波长/ μm	熔点/℃	密度/(g/cm ³)
	无压烧结	热压法				
Al ₂ O ₃	1650~1950 ℃	1500 ℃ 40 MPa	六方	1~6	2050	3.98
BeO	1700~2000 ℃	1500 ℃ 30 MPa	六方	0.2~5	2570	—
MgO	1550~1800 ℃	1400 ℃ 40 MPa	等轴	0.5~9	2800	3.58
Y ₂ O ₃	2200 ℃	900 ℃ 80 MPa	等轴	0.25~10	2410	5.31
ZrO ₂	1450 ℃	1300~1750 ℃ 50 MPa	等轴	1~10	2700	5.98
ThO ₂	2380 ℃	—	等轴	0.5~10	2800	—

*可见光波长 0.4~0.72 μm , 超短红外 0.72~1 μm , 短红外 1~1.29 μm , 中红外 2.9~5.5 μm , 远红外 7.5~14 μm

1.2 透明陶瓷的特征

陶瓷材料的透光性能主要取决于微结构中各组成相的折射率之差, 结晶的多相性(不均一性)、结构特性、晶粒的排列、晶粒尺寸、玻璃相和气相的存在等都是影响陶

瓷材料光学性能的重要因素。

入射到陶瓷体的光线经历了陶瓷体表面反射和内部吸收、散射的过程,而引起光能的损失。从图 1.1 中可以看出,当光进入到陶瓷内部时,陶瓷材料的晶界(包括成分、厚度、形态等)、缺陷(包括气孔、杂质等)以及晶粒(包括晶格对称性、尺寸、形态、组分的一致性等)都会对透光性产生影响。除此以外,材料的多孔性和表面加工光洁度也会影响其透明度。

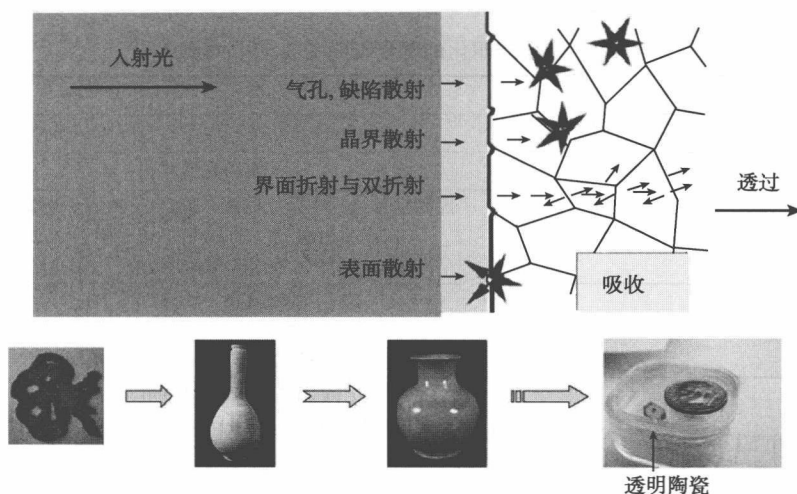


图 1.1 陶瓷微结构中的光散射

同时由于陶瓷是一种多晶材料,与单晶(晶体材料)和无定形相(玻璃材料)不同,晶粒与晶粒之间的界面是陶瓷材料所特有和极为重要的结构特征,是晶粒与晶粒之间连接的纽带,也是微观物质迁移和性能体现以及传递的桥梁,因此晶界的作用与调控是实现陶瓷材料透明化与功能化的一个至关重要的因素。为了减小晶界产生的散射损耗,可以选择没有各向异性的物质,控制晶粒尺寸并减少晶界,另外还要控制添加剂可能产生的各向异性。表 1.1~表 1.4 是陶瓷透明化的要素及制备工艺中的几个要点^[4]。

早期的透明陶瓷主要利用其透光性能。美国 GE 公司于 1965 年利用 Lucalox 制成高压钠灯灯管,于是新型的第三代新光源——高压钠灯正式问世。自 1966 年起,美国 GE 公司等厂家开始迅速大批量生产高压钠灯,但是以后的半个世纪,这一领域的研究进展甚微。

20 世纪 60 年代随着蓝宝石单晶材料的出现而产生激光技术,陶瓷作为无机材料的重要组成部分之一也和玻璃、单晶激光介质一样开展了广泛的研发。 CaF_2 透明陶瓷于 60 年代实现了激光输出,70 年代 $\text{Nd:Y}_2\text{O}_3$ 实现激光输出,但是一直到 20 世纪末激光透

明陶瓷的输出功率只在毫瓦水平，并没有实用价值，其主要的原因在于透明陶瓷材料的光散射损耗一直偏大。20 世纪 70 年代起陶瓷发动机项目的开展推动了陶瓷材料学的发展，尤其在晶界设计与微结构控制方面的深入研究，以及纳米技术在制作陶瓷所需原料的控制方面为提高透明陶瓷的光学性能提供了技术支撑，从而为 21 世纪透明陶瓷的性能实现腾飞奠定了基础。21 世纪初，随着激光透明陶瓷、闪烁透明陶瓷等性能的不断提高而趋向实用化，透明陶瓷的功能化应用受到了极大的关注，发达国家纷纷将其作为纳米技术、材料及其器件研发的重点，其市场前景巨大。

表 1.4 陶瓷透明化的要素及制备工艺中的要点

要素		制备工艺中的要点
减小基体材料的吸收系数	高透光性基体材料	选择在所需波长范围内没有自吸收的基体材料
	高纯	使用高纯原料
	控制组分	控制制备过程中杂质的混入(混合、粉碎、煅烧、烧结)
		控制原料组成(基体材料组成、微量添加物)
		控制制备过程中的组分偏移(煅烧、烧结时的挥发)
	减少气孔	气氛(氧化、还原、压力)
使用粒径小的原料粉体		
减小第二相产生的散射系数	减少析出物	控制烧结时晶粒的异常长大(微量添加物、烧结制度)
		除去成型后粉体中的巨大空洞
		使用能提高扩散速度的气氛(除去气孔内残余气体)
		选择合适的组分
		控制制备过程中组分偏移
		组分均匀化
减小晶界产生的散射系数	减少光学各向异性	选择没有各向异性的物质
		减少晶界
		控制添加物导致的各向异性

1.3 透明光功能陶瓷的分类

材料是人类赖以生存和发展的物质基础，人类的文明发展与材料的进步息息相关。陶瓷材料也与其他材料相同，在人类社会发展中留下深深的烙印。一般就其应用分为结构与功能材料两大类，结构陶瓷材料主要以其力学、耐高温、耐腐蚀等性质为应用基础；功能陶瓷材料是指通过光、电、磁、热、化学、生化等作用后具有特定功能的材料。

人类自古以来与光相伴，光谱成分丰富齐全的太阳光，是地球上一切生命的源泉，是人类健康的真正保证，人体的免疫功能只有经过太阳光的适当照射才能完整、健全和得以正常发挥。随着认识与科技的发展，人类也从被动地接受阳光到利用阳光，从远古时代把火作为直接信号使用，发展到现在以玻璃的“透明性”为基础特性研制的

光纤作为介质实现远距离信息网络的构建。21 世纪,已经成为了以将光以光子形式利用产生的光子计算机为开端,以光为媒,所有的科学技术大融合的时代(图 1.2)。考虑到这样的时代背景,产生光、并利用光与光之间相互作用的科学技术,以及支持其后的光功能陶瓷材料的开发就显得至关重要。各种光功能材料的发现与发展也将促进激光技术与光电子技术等的发展。

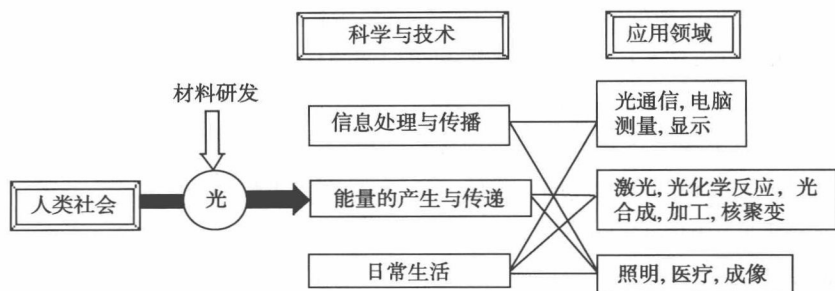


图 1.2 人类与光的匹配

目前市场上的透明光功能材料还是以单晶与玻璃为主。作为现代材料领域最新发展的先进光功能透明陶瓷不但具有陶瓷材料的特性,如在制备成本、尺寸(与单晶相比)、光功能效应和力学性能以及热性能等方面(与玻璃相比)具有优势,而且是可以运用复合材料的设计原则研制出结构和组分复合与功能集成的光功能陶瓷,这将在光功能系统设计方面提供无可比拟的灵活性。透明陶瓷不仅具有优异的透光性,而且其作为陶瓷所具有的高强度、高硬度、高透明度、耐腐蚀、耐高温等性能远优于一般光学材料,用它可以制成各种用途的电-光、电-机军民两用器件,在节能、医学、激光、检测、勘探等方面有广泛应用前景,已经得到世界各国的极大重视,发达国家正逐步加大研究投入。目前各学科之间、学科与工艺技术之间的相互作用与渗透,对无机光功能材料的发展将产生深远的影响,学科交叉使结构-功能以及各种材料之间的界限已变得模糊,复合材料的设计理念将使光功能透明陶瓷在结构复合与组分复合方面通过协同作用获得最佳性能,以及开发出新的功能。本书重点介绍的光功能透明陶瓷为激光陶瓷与闪烁陶瓷。

1.4 固体激光技术概述

1.4.1 激光技术的发展简史

爱因斯坦(Einstein)在 20 世纪 30 年代描述了原子的受激辐射。在此之后人们很长时间都在猜测,这个现象可否被用来加强光场,因为前提是介质必须存在着布局数反

转的状态。在一个二能级系统中,这是不可能的。人们首先想到用三能级系统,而且计算证实了辐射的稳定性。1958年,美国科学家肖洛(Schawlow)和汤斯(Townes)发现了一种神奇的现象:当将氦光灯泡所发射的光照在一种稀土晶体上时,晶体的分子会发出鲜艳的、始终会聚在一起的强光。根据这一现象,他们提出了“激光原理”,即物质在受到与其分子固有振荡频率相同的能量激励时,都会产生这种不发散的强光——激光。肖洛和汤斯的研究成果发表之后,各国科学家纷纷提出各种实验方案,但都未获得成功。1960年5月16日,美国加利福尼亚州休斯实验室的科学家梅曼(Maiman)宣布获得了波长为 $0.6943 \mu\text{m}$ 的激光,这是人类有史以来获得的第一束激光,梅曼因而也成为世界上第一个将激光引入实用领域的科学家^[5,6]。

固体激光器是以掺杂的玻璃、晶体或透明陶瓷等固体材料为增益介质的激光器。固体激光器所采用的固体工作物质,是把具有能产生受激发射作用的金属离子掺入晶体、玻璃等材料中而制成的。梅曼研制出第一台红宝石激光器后不久,世界各国科学家便广泛深入研究了在固体中能产生受激发射作用的三类金属离子:① 过渡金属离子(如 Cr^{3+});② 大多数镧系金属离子(如 Nd^{3+} 、 Yb^{3+} 、 Tm^{3+} 等);③ 铜系金属离子(如 U^{3+})。有多种工作物质获得了激光输出,其中最引人注目的是掺钕玻璃和掺钕钇铝石榴石晶体。20世纪60年代,固体激光器的结构和性能不断改善,输出能量和脉冲重复频率不断提高,采用调Q技术将脉冲压缩到10 ns量级,获得了峰值功率达兆瓦级以上的巨脉冲,适应了许多实际应用^[7~12]。

由于激光具有不发散的特性,可以按照光的速度在空间传输能量,所以各国军方、科学家都在致力于发展激光武器。激光武器是利用激光束直接攻击目标的定向能武器,由于激光具有很强的方向性,有可能在一定距离处的靶的目标上得到高的能量密度。由方向的集中所带来的目标处能量密度的增加,称为定向增益。对于一个非定向的、各向同性的光源,离光源距离Z处的平均能量密度为^[13]

$$\varepsilon_0 = \frac{E}{4\pi Z^2} \quad (1.1)$$

式中, E 为光源的总能量。而对于一个定向的光源,若其发散半角为 θ , 则距离光源 Z 处,光斑只是一个半径为 $a = Z \sin \theta$ 的光斑,其能量密度为

$$\varepsilon_1 = \frac{E}{\pi a^2} = \frac{E}{\pi (Z \sin \theta)^2} \approx \frac{E}{\pi Z^2 \theta^2} \quad (1.2)$$

则定向增益系数为

$$G = \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_0} = \frac{4}{\theta^2} \quad (1.3)$$

激光武器效能的特征量——亮度:若靶目标被破坏的能量密度阈值为 q , 则为了

造成破坏必须满足的条件是

$$\frac{E}{\pi a^2} = \frac{\bar{P}\tau}{\pi a^2} \geq q \quad (1.4)$$

式中, E 为到达靶面的激光的总能量, $\bar{P}$ 为激光平均功率, τ 为激光作用时间。

激光武器的主要作战目标是各类导弹、飞机和卫星等, 一种目标又有着性质非常不同的各个部位。破坏机理和阈值不仅与这些目标部位的物理和化学特征有关, 而且与强激光的工作模式、波长等参数有关, 实际上是一个十分复杂的问题。不过作为一般的了解, 可将破坏的目标部件分为软部件和硬部件两类进行讨论。

(1) 软部件的破坏。导弹、卫星上的光电传感器(如可见光和红外探测器)是一类重要的软部件(人眼也可被视为一种光学传感器)。其破坏机理按破坏阈值可分为两种。一是热致盲, 即在较弱激光的作用下, 探测器元件温度升高, 使调制信号减弱乃至消失, 从而导致功能暂时失效(激光照射停止后, 功能可逐渐恢复)。导致这种破坏的阈值较低, 约为每平方厘米数瓦至十瓦的功率密度, 照射数十毫秒, 可称为软部件的软破坏。二是永久性破坏, 即在较强激光照射下, 探测元部件被烧坏、崩裂、脱落, 不能再使用, 称为软部件的硬破坏。其破坏阈值约为每平方厘米几十瓦的功率密度。导弹的射频头罩是另一类软部件, 在强激光照射下, 其表面被烧蚀、炭化, 引起其电学性能变化, 从而影响微波信号的强度, 使导弹不能有效制导, 导致这种破坏所需功率密度约为每平方厘米数百瓦, 为软部件的硬破坏。

(2) 硬部件的破坏。硬部件包括导弹壳体材料、机身、油箱、战斗部件等。破坏机理可分为: 热破坏、力学破坏和热力联合破坏。

一个激光武器的基本构成是: 主激光器, 发射与捕获、跟踪、瞄准系统, 校正大气畸变的自适应光学系统和与之相关的信标系统, 系统的指挥、控制及测试评估系统, 必要时还有能源及支持系统等。

激光武器按应用目的的不同分为战术激光武器(激光致盲与干扰武器和激光防空武器)和战略激光武器(激光反卫星武器和反洲际弹道导弹激光武器), 以及介于战术和战略应用之间的所谓的“战区激光武器”。激光致盲与干扰武器是重要的光电对抗装备, 它仅需采用中小功率器件, 技术较简单, 现已开始装备部队使用。战术防空激光武器可通过毁伤壳体、制导系统、燃料箱、天线、整流罩等拦击大量入侵的精确制导武器。将激光武器综合到现有的弹炮系统中去, 可弥补弹炮系统的不足, 发挥其独特的作用。激光反卫星武器可通过干扰、破坏卫星上的光电设备或摧毁平台, 使敌方的卫星失效。反卫星激光武器还可以破坏敌方的空基信息系统, 为己方的战略导弹打开攻击通道。

反洲际弹道导弹的激光武器有可能在多层次的战略防御系统中作为敌方洲际导

弹助推拦截的手段,曾是美国的“战略防御倡议”中的重点研究项目之一。但是这类武器的技术难度很高,并且其研制与部署受政治、经济和军事等因素的影响和制约。战区防御机载激光武器主要用于拦截助推阶段中近程弹道导弹,美方已选定将其作为助推拦截方案对象。

自从第一台激光器问世,激光武器就成为许多国家追求的目标。20世纪中后期,先后研发高能钕玻璃激光器、气动CO₂激光器、化学激光器、自由电子激光器和X射线激光器等。特别是1983年美国里根总统提出“战略防御倡议”后,投资迅猛,高能激光器研发工作形成高潮。在第一轮竞争中,氟化氘(DF)和氧碘(COIL)两种化学激光器先拔头筹,功率分别达兆瓦级和十万瓦级,已正式纳入武器装备的研究计划。但是气体和化学激光器的缺点也是显而易见的,如气体激光器发光波长在10 μm,体积过于庞大;化学激光器排放有毒废气,战场上很难大规模安全应用。

美国军方和激光界对高能固体激光器的潜在优势基本上有以下共识:① 大气传输和衍射有利于波长较短的固体激光器;② 固体激光器质量轻、体积小,而且坚实;③ 可定标放大,即可按比例放大;④ 整个系统完全靠电运转、不需要特别的后勤供应;⑤ 没有化学污染;⑥ “弹药”库存多,每发“弹药”成本低;⑦ 军民两用性强,发展固体激光器对推动民用技术可起杠杆作用。由于以上优势,美国海陆空三军和海军陆战队都看好固体激光器,认为它将是最有希望的下一代激光武器。

20世纪70年代,基于钕玻璃的大功率激光器系统有较大的进展,峰值功率突破10¹¹ W。中小型激光器进入实际应用化阶段,操作简单,寿命更长,同时注重改善光束质量,提高效率。20世纪80年代,固体激光器进入蓬勃发展期,钛宝石晶体(Ti:Al₂O₃)的出现使得超短、超快和超强激光成为可能,飞秒(fs)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年代钕酸钇晶体(Nd:YVO₄)的出现使得固体激光的发展进入新时期——全固态激光科学技术(solid-state LD pumped laser, SSDPL);进入21世纪,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,激光材料也在晶体、玻璃、光纤、陶瓷四方面全方位迅猛展开,如微-纳米级晶界、完整性好、制作工艺简单的多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^[14,15]。

1.4.2 实现高功率固体激光的技术途径

历史上由于难以获得大尺寸高光学质量的激光增益介质,高功率固体激光武器的发展一直受到很大的限制。20世纪80年代,大尺寸优质晶体激光材料生长工艺的突破性发展,特别是进入21世纪,激光透明陶瓷制备工艺得到突破,使得高功率固体激光得到了快速的发展。固体激光器现在已达到100 kW的武器级别。透明陶瓷由于

其采用粉末冶金的方法,不需要贵金属坩埚,具有制备优势,可以制备大尺寸材料。同时透明陶瓷不存在晶体生长过程中出现的核芯,材料利用率高,陶瓷的热导率与晶体一致,所以可以获得高功率激光输出。透明陶瓷已经成为未来高功率固体激光的首选材料。目前固体激光能够实现 100 kW 的技术途径有热容激光器、紧凑有源反射镜激光器、板条激光器和光纤激光器等多种^[15]。

1. 固体热容激光

在固体热容激光器(SSHCL)出现以前,以高能量脉冲工作的固体激光器的输出功率不超过 1000 W。激光器工作时产生的热是提高其功率的瓶颈,系统中任何一个激光器都会产生废热。对于固体激光器而言,这种热积存在光学元件内。如果热量不能传出去,就会使光学元件产生损伤。

大多数固体激光器系统在工作时连续冷却,以避免这种损伤。废热从激光介质内传导至表面,由水等冷却剂带走。因为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。固体热容激光器的创新之处就是激光工作过程中(10~20 s)是绝热的,即停止泵浦后再冷却激光工作物质。因此热容固体激光器表面的温度就会高于中心温度,这样就与传统激光器不同。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,因而热容激光器可以工作于更高的温度状态。

独特的脉冲工作模式使固体热容激光器成为世界上功率最高的固体激光器。与其他脉冲固体激光器相比,固体热容激光器在一次猝发中的平均功率比那些重复模式的激光器高 10 倍以上,而与最大功率的非脉冲式固体激光器相比,固体热容激光器的平均功率则高 2 倍。

固体热容激光器与传统的高功率大能量领域的化学激光器和气体激光器相比还有许多其他优点,如在较短波长的激光范围工作的能力。较短波长允许激光束在大气中传播更远的距离,且光束发散较少。例如,在给定同样尺寸光束的情况下,大功率氟化氙化学激光器在理论上可达到的最小光束发散面积比固体热容激光器的光束发散大 12 倍,而二氧化碳激光器比固体热容激光器大 100 倍以上。热容激光器对于激活离子的能级结构有一定的要求:下能级不能过于接近基态,也不能过于接近激光上能级。最佳的激光下能级在 3200 cm^{-1} 左右,铍离子下能级在 2300 cm^{-1} 比较适合。而镱离子由于下能级过于接近基态,不适合热容激光器。

1995 年, Walters 等发表了关于固体热容激光器的研究文章。1996 年 6 月,美国

劳伦斯·利弗莫尔国家实验室(Lawrence Livermore National Laboratory)的 Albrecht 等申请了“高能量泵发固体热容激光器”的专利。1998 年, Albrecht 在 *Laser and Particle Beams* 发表的一篇文章中详细介绍了固体热容盘片激光的概念和理论计算。美国军方由 White Sands Missile Test Range 计划的指引, 在美国劳伦斯·利弗莫尔国家实验室的支持下, 积极的推进基于 Nd:GGG 晶体的固体热容激光器的研究。2002 年 12 月, 美国劳伦斯·利弗莫尔国家实验室二极管泵浦固体热容板条激光器首次出光, 平均功率为 2.7 kW。2003 年, 美国劳伦斯·利弗莫尔国家实验室 LD 泵浦的 Nd:GGG 激光器的平均输出功率已经达到 10 kW, 在 2004 年又突破 30 kW, 2007 年达到一个脉冲 100 kW, 每秒 200 个脉冲。2006 年, 美国劳伦斯·利弗莫尔国家实验室利用日本神岛化学公司(Konoshima Chemical Ltd.)提供的 Nd:YAG 透明陶瓷(100 mm×100 mm×20 mm)板条进行热容激光实验。他们利用 4 块这种规格的透明陶瓷获得了 25 kW 的激光输出, 激光输出时间为 10 s, 占空比为 10%。另外他们尝试用五块获得了 37 kW 激光输出, 当然激光运行时间更短。

2. 盘片激光

盘片激光是从一个大面上将热量导走, 这样热流的距离就非常短, 即使用大的泵浦能量也不会在盘片上产生大的温度梯度。如果盘片的直径远大于厚度, 则热流可以看成是沿一维方向并且平行于激光方向, 这样就会大大地降低热机械效应。根据盘片的热应力极限, 可以计算出当激光输出为连续或者准连续时, 四能级粒子可提取能量的功率。盘片激光的传播方向沿片的短轴方向, 增益达到一定水平时, 长轴方向的寄生振荡往往会耗尽晶体片中的能量, 严重影响期间的激光输出。因此控制寄生振荡是研制高功率片状器件的核心问题之一。

3. 板条激光

传统的板条激光器采用侧面泵浦的形式, 泵浦光从两个大面或侧面照射进晶体, 采用水冷热沉来进行散热。采用这种结构泵浦光充满整个晶体, 其整个体积内都被激发。在均匀泵浦的情况下, 工作介质内的温度梯度是一维分布的, 只存在垂直于用水冷却的晶体大面的方向上。这种一维的热场分布, 不易产生热致双折射, 从而可以防止热退偏, 但会产生竖直方向上的热透镜。为了消除热透镜的影响, 通常板条晶体并不是方形, 而是将两个供振荡激光通过的端面绕长轴方向倾斜布儒斯特角, 并将两个安装水冷热沉的大面也抛光。振荡激光在板条晶体内部通过两个大面的全反射而呈“之”字形传播, 让激光在另一个方向上不同区域内的不同热影响相互抵消, 从而达到减弱甚至消除热透镜作用的目的。目前达信公司已经利用板条激光系统获得 100 kW 激光输出。