



全国高技术重点图书·激光技术领域

激光与材料 相互作用 物理学

陆建 倪晓武 贺安之 著

机械工业出版社

激光与材料相互作用物理学

陆 建 倪晓武 贺安之 著



机械工业出版社

本书从理论和实验上全面研究了激光与材料相互作用过程中所发生的几种物理现象。这些物理现象包括激光熔融、靶材气化、等离子体点燃、膨胀与屏蔽,激光支持燃烧波和爆轰波的产生、发展与传播过程,激光对靶材的冲量作用,以及激光与固体透明介质和光学介质薄膜相互作用的规律。讨论内容包括物理现象、模型建立、数学方程与数值解法、实验测试方法与结果等。

本书以物理概念为基础,通过深入浅出的原理论述,结合数学模型,全面反映国内外在本领域的最新成果,从而引导读者进行研究,并解决应用中的实际问题。

本书可供从事激光与材料相互作用及其应用领域的科研人员、教师、研究生和大学生及激光加工工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

激光与材料相互作用/陆建... 北京:机械工业出版社,1996.10

ISBN 7-111-05142-3

I. 激... I. 陆... 激光与材料-相互作用-物理学
N. TG665

中国版本图书馆 CIP 数据核字(96)第 09655 号

出版人:马九荣(北京市百万庄南街一号 邮政编码:100037)

责任编辑:韩雪清 版式设计:冉晓华

封面设计:郭景云 责任校对:倪晓武

责任印制:卢子祥

三河市宏达印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

1996年11月第1版第1次印刷

850mm×1168mm 1/32·7印张·176千字

0 001 1300册

定价:11.80元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

《全国高技术重点图书》 出版指导委员会名单

主 任： 朱丽兰

副主任： 刘 杲

卢鸣谷

委员： (以姓氏笔划为序)

王大中	王为珍	牛田佳	王守武	刘 仁
刘 杲	卢鸣谷	叶培大	朱丽兰	孙宝寅
师昌绪	任新民	杨牧之	杨嘉墀	陈芳允
陈能宽	罗见龙	周炳琨	欧阳莲	张钰珍
张效祥	赵忠贤	顾孝诚	谈德颜	龚 刚
梁祥丰				

总干事： 罗见龙 梁祥丰

《全国高技术重点图书·激光技术领域》 编审委员会名单

主任委员： 陈能宽

委 员： 于 敏 王乃彦 甘福熹 陈佳洱

杜祥琬 俞大光 刘 仁

与本著作有关的研究项目得到下列基金资助：

国家教委《跨世纪优秀人才计划》专项基金
霍英东教育基金会高等院校青年教师基金
江苏省自然科学基金

本著作的出版得到下列基金资助：

机械工业出版社出版基金
南京理工大学学术论著基金

前 言

自从1961年世界上第一台激光器诞生至今,各种激光器层出不穷,如气体激光器、液体激光器、固体激光器、化学激光器、准分子激光器和半导体激光器等。这些激光器的应用,遍及工业、农业、医学、军事、科学研究等许多方面。例如,固体脉冲激光器的聚焦光束能在坚硬的材料上打出直径为微米数量级的小孔,这一现象在精密仪器加工、激光微外科、激光微加工、激光打孔、激光切割等方面均获得了广泛和成功的应用。又如,美国政府战略防御计划(SDI)中,关于激光器的开发和应用研究经费占有相当高的比例,激光器在空间防御武器系统中有着重要的应用,诸如激光阻止或杀伤敌方目标而完成特定作战任务,摧毁敌方目标上光电传感器和制导系统等。这些应用的物理基础都基于激光与材料相互作用物理学。随着激光应用的迅速发展,这方面的基础研究愈显薄弱,从而广泛地受到人们重视。

激光与材料相互作用的结果之一就是激光对材料产生了破坏。这种相互作用过程既取决于激光特性和材料特性等,也与作用的外部环境有关。与激光特性有关的因素如作用激光的波长、能量、功率、脉宽、脉冲结构、重复率以及作用次数等,其中任一种因素对相互作用过程的影响本身就是一重要的研究课题。激光参数的多样化无疑给这方面的研究增添了巨大的活力,这些研究能够为合理地使用激光器提供理论基础和实验依据,也进一步开拓了激光器的应用前景。与材料特性有关的因素主要取决于材料的种类和性质,这些材料可以是金属、合金,也可以是烧蚀材料、复合材料或陶瓷,以至各种光学涂层。

当激光尚未照射到靶材上时,激光与材料是两个相对独立的

部分。一旦激光作用于材料表面,其表面就会吸收和反射激光,这种吸收和反射主要取决于材料表面的光学性质。材料表面吸收入射的激光能量,使其表面温度上升,从而改变材料表面的结构和性能,甚至造成不可逆的破坏。这在激光加工过程中,如切割、淬火、焊接、辐射以及材料表面处理等方面,已得到广泛的应用。材料在高功率激光作用下,表面物质迅速吸收激光能量,其自身温度迅速上升至气化温度,从而出现气化。气化后的物质蒸气继续吸收激光能量,使其温度进一步升高,形成蒸气等离子体。这种等离子体的出现对靶与激光相互作用将产生巨大的影响。这种影响主要表现在三个方面,一是蒸气等离子体自身对激光有很强的吸收作用,能使后续的激光能量部分地甚至全部不能到达材料表面,这就在材料与激光束之间形成了屏蔽激光能量的“墙”;二是蒸气等离子体对材料的作用,主要表现为力学作用和热学作用(包括压力和冲量传递、靶材内应力波等力学效应);三是相互作用过程中蒸气等离子体的点燃和发展过程(包括等离子体时间和空间行为)。另外,激光和材料的相互作用过程还受外部环境的影响,材料表面附近气体的性质(包括成分、压力、有无杂质等)对相互作用都有重大的影响。

激光与材料相互作用的物理过程是十分复杂的,其原因与靶材的多样化、作用激光参数的多样化、作用条件的多样化都有关。因此,要将每种情况都用理论或实验进行描绘的本身就是一项庞大的课题,而且激光和材料相互作用的物理过程涉及诸多学科,它包括激光物理、传热学、等离子体物理、非线性光学、热力学、气体动力学、流体力学、材料力学、固体物理、固体材料的光学性质等方面。为此,国内外学者已进行了大量的理论分析和实验研究,得到了许多有价值的实验数据,揭示了一些重要的相互作用过程的规律。

在 60 年代初期,人们就开始研究高功率激光在大气中产生的火花现象,并认为高强度的激光能使空气介质发生雪崩电离,并从电子的增长等方面去解释了这种光学击穿现象。同时人们也开展

了高功率激光与靶相互作用的研究,通过各种方法观察和测量了激光熔融、激光气化及激光等离子体现象,研究了等离子体的形成、激光支持的燃烧波、激光支持的爆轰波、等离子体对激光的屏蔽效应、靶冲量的传递以及靶材内部应力波和靶的热耦合等方面的问题。虽然国内外科学工作者近 30 年来在高功率激光与靶材相互作用方面做了大量的研究工作,并在继续开展工作,但有关高功率激光和靶材相互作用问题还远没有圆满地得到解决,存在问题还很多。其中的原因主要有三点:一是研究对象本身的复杂性和多样化;二是激光器本身的日益发展带来了新的研究内容,激光的新应用也带来了新的理论问题;三是一些基本问题和观点、模型以及适应范围等仍没有得到清楚地解释和验证。

我们认为在高功率激光和材料相互作用领域中,尚有以下几个方面的问题需要人们做大量的基础性理论和实验研究工作。

笔者自 80 年代以来一直在激光与材料相互作用机理研究方面进行研究,取得了丰硕的成果。我们在研究高功率激光与材料相互作用过程中,对等离子体点燃和时空发展行为、激光支持吸收波的点火和时空行为、激光对靶的力学效应等做了大量的基础性的理论和实验研究。我们采用光学干涉探测和阴影照相法,在一台调 Q-Nd:YAG 振荡-放大激光器上同步诊断了激光与铝靶相互作用产生等离子体的起始过程,得到了靶蒸气等离子体的序列马赫-曾德尔干涉图,完成了对激光等离子体点燃和发展过程的全面测量;建立了一套等离子体参量(如温度、密度、压力、电离度、电子密度和吸收系数等)测量原理和方法,从而解决了高功率激光等离子体流场的测试问题;研究了激光支持吸收波的产生和发展过程,提出了激光支持爆轰波的等离子体击穿模型,并获得了激光支持爆轰波的序列干涉图,从而解决了激光支持爆轰波流场的定量测试问题;还在对激光与材料相互作用过程中压力、冲量传递机理进行详尽的理论研究的基础上建立了激光与材料相互作用过程中冲量传递的理论体系,解决了激光冲量传递理论的计算问题。

本书是在总结了国内外激光与材料相互作用物理机理研究的

基础上,结合最新科研成果,特别是在笔者所在研究所多年科研和教学工作成果的基础上撰写的专著。全书力求以物理概念为基础,结合数学描述,注重以清晰的物理概念和模型分析,模拟和解决激光与材料相互作用过程中所产生的主要现象与问题,力求使读者对激光与材料相互作用的物理机理研究这一领域有较完整的认识。随着激光应用基础研究工作的进一步开展,本书中的一些物理模型或理论可能会进一步发展,热诚欢迎广大读者不吝指正。

著 者

1995 年 10 月

本书常用符号表

A	吸收系数	I	光强
A_i	面积	I_A	冲量
a_i	热扩散率	I_l	单位面积冲量
$B(t)$	绝对黑体辐射函数	j	冲量能量耦合系数
C	热容	K_s	逆韧致吸收系数
C_T	体积热容	L	亮度
c	光速	L_b	蒸发潜热
c_s	声速	L_T	潜热
c_p	比定压热容	L_i	熔化潜热
c_v	比定容热容	Ma	马赫数
c_i	比热容	M_{mol}	摩尔质量
D	激光束腰直径	m	质量
d	激光光束直径	N	粒子密度
d_θ	光学厚度	n	粒子数密度, 折射率
E	能量	P	激光功率密度
$\bar{E}$	电场场强	p_A	压力
E_f	自由能	p_p	光压
E_L	电离能	p_s	等离子体区压强
E_{Lm}	电子激发能	Q	热量
E_p	激光单脉冲能量	Q_H	气化热
E_u	内能	q	能量增益
E_{uav}	单位体积内能	R'	聚焦参数
f	透镜焦距	R_i	热损耗系数
G	切变模量	S	面积
G_t	热导	T	温度
h	表面传热系数	T_m	最高温度

T_n	熔化温度	ϵ'	透镜参数
T_v	气化温度	η'	屏蔽系数
T_s	表面温度	θ	发散角
t	时间	λ	激光波长
t_p	激光脉冲宽度	λ_r	热导率
V	体积	μ	粘度
v	速度	μ_v	泊松比
v_m	质量变化率	μ_L	拉姆常量
v_m'	质量迁移率	ν	频率
v_p	比体积	ν_L	拉姆常量
v_w	波速	$\Delta\nu$	线宽
Z	原子序数, 距离	ρ	密度
z	离子电荷数, 距离	ρ_R	反射比(反射率)
α	电离度	ρ_p	等离子体区密度
α_A	吸收比(吸收率)	σ	应力
α_s	声衰减系数	τ_T	透射比(透射率)
β	质量迁移率	Φ	势能标量
γ	比热比	Ψ	辐射能流
γ_b	绝热指数	ω	激光光斑半径, 角频率
γ_E	电致伸缩系数	ω_r	激光束腰半径
ϵ	发射率, 介电常数		

目 录

前 言

本书常用符号表

第一章 激光参数与聚焦特性	1
第一节 激光器的基本类型	1
第二节 激光的特性	6
第三节 激光的参数和测量	10
第四节 激光的聚焦特征	13
第二章 激光的吸收和加热	18
第一节 激光的吸收	18
第二节 激光对材料的加热	25
第三章 激光熔融与气化	35
第一节 激光熔融现象	35
第二节 靶材的气化模型	38
第三节 靶材气化时的 Knudsen 层	41
第四节 Knudsen 层外的蒸气流动	44
第五节 气化时间的估计	47
第四章 靶表面激光等离子体产生与发展机理	50
第一节 蒸气的电离过程	50
第二节 Saha 方程	53
第三节 蒸气等离子体发展模型	56
第四节 多温电子等离子体的膨胀模型	61
第五节 等离子体点燃时间	65
第五章 激光等离子体的屏蔽	69
第一节 激光等离子体屏蔽现象	69
第二节 等离子体屏蔽机制	71
第三节 等离子体屏蔽实验测试的方法与结果	71
第六章 激光等离子体参数测量	80

第一节	激光干涉测量原理	80
第二节	激光等离子体参数测量原理	83
第三节	激光等离子体实验测试与结果	88
第七章	激光支持燃烧波的产生与传播	98
第一节	激光支持吸收波现象	98
第二节	激光支持燃烧波	101
第三节	激光支持燃烧波的流体动力学描述	102
第四节	激光支持燃烧波的点火机制	106
第五节	激光支持燃烧波的实验研究	108
第八章	激光支持爆轰波的产生与传播	111
第一节	激光支持爆轰波的基本结构	111
第二节	激光支持燃烧波到爆轰波的转化	112
第三节	激光支持爆轰波的流体动力学分析	114
第四节	激光支持爆轰波的点火机理——等离子体 击穿模型	116
第五节	影响激光支持爆轰波点火的因素	120
第六节	激光支持爆轰波的产生和发展过程的实验测试	122
第七节	有关激光支持吸收波的有关实验研究	133
第八节	激光支持爆轰波和燃烧波的区别和判别	134
第九章	激光对靶的冲量传递	136
第一节	喷射物质的反冲	137
第二节	激光支持爆轰波波后的压力	139
第三节	激光支持爆轰波对靶面的压力	140
第四节	激光支持爆轰波对靶面压力的历史	144
第五节	激光对靶材的冲量传递	147
第六节	激光靶冲量的实验与测试	161
第七节	激光支持爆轰波的一种新判断方法	167
第十章	激光与固体透明介质相互作用的力学效应	169
第一节	光致弹性应力波的激励机理	169
第二节	光致弹性应力波的实验研究	173
第三节	强激光在透明介质中的自聚焦原理	175
第四节	强激光辐射后的爆轰破坏	178

第五节	固体透明介质内部强激光破坏的实验研究	183
第十一章	激光与光学介质薄膜相互作用的机理	185
第一节	激光与光学介质薄膜相互作用过程的理论描述	185
第二节	激光诱导光学介质薄膜产生的等离子体	192
第三节	激光等离子体及其冲击波对光学介质薄膜的 破坏机理	194
附 录		200
参考文献		204

第一章 激光参数与聚焦特性

激光与材料相互作用的过程,不仅取决于被作用材料的特性和作用时外部环境的影响,其中更重要的因素之一是作用激光束的特性。因此,在研究激光与材料相互作用物理学之前,首先要对激光器的基本类型和特性,激光参数和测量方法,以及激光的聚焦特性进行必要的讨论。

第一节 激光器的基本类型

自1961年世界上第一台激光器诞生到现今,各种各类激光器层出不穷,如以激光工作物质进行分类就有气体激光器、液体激光器、固体激光器、化学激光器、准分子激光器和半导体激光器等。同样,也可以以激光波长进行分类,或以激光器工作方式、输出功率等特性进行分类。

这些激光器所具有的共同特性和结构特点是都具有工作物质、谐振腔和激励源,通常又把这三个部分称为形成激光的三要素。工作物质必须是增益介质,它可以是气体(包括单一种气体和混合气体)、固体或液体。工作物质能在特定的条件下,使高能级的粒子数多于低能级的粒子数,即粒子数反转。光学谐振腔的作用是使受激辐射产生的光在腔内不断地来回反射,在此期间,每经过一次工作物质,光就得到一次放大,当光被放大到超过腔内损耗(如衍射、吸收、散射等损失)时,就产生了光振荡,并在部分反射镜一端输出激光。而激励源则是为激光器提供能量的来源和方式,以在工作物质中形成粒子数反转,一般有电激励和光激励等。对固体和液体激光器常采用光激励(又称光泵浦),也就是用强光去照射工作物质,工作物质中的粒子吸收了光的能量后,就从基态激发到高

能级去,使激励光的光能变成了原子的激发能。光激励方法可选择激发工作物质中的粒子到特定的能级。在这种条件下就可能获得受激辐射和光放大。

在各种激光器中,用以与材料相互作用的激光工作物质通常是固体(如 Nd^{3+} :YAG 晶体、红宝石晶体或钕玻璃)和气体(CO_2 、 Ar^+ 、 Kr^+ 或 N_2 气体等),在光化学中也经常使用液体激光器。

一、固体激光器

世界上第一台激光器就是固体激光器,它们至今仍是应用较广泛的一种激光器。它具有输出能量或功率高的特点,与气体激光器相比,在输出光能相同时,固体激光器的体积要小得多,因而便于携带与使用。但是,固体脉冲激光器的种类和输出谱线数有限,因而应用范围受到一定的限制。

固体激光器均以绝缘晶体或玻璃作为工作物质,将能起受激发射作用的激活离子镶嵌在基质中,如 Nd^{3+} :YAG 晶体中的 Nd^{3+} 离子,激活离子的密度为 $10^{19} \sim 10^{22} \text{cm}^{-3}$,比气体工作物质的粒子密度大得多。固体激光器一般采用光激励方式使粒子数反转。为使激励光更多地作用于工作物质,可在激光工作物质周围和泵浦灯周围使用聚光器。光学谐振腔由一块镀有全反射膜层的全反射镜和一块镀有部分反射和部分透射膜的输出镜组成,受激辐射产生的光子在光学谐振腔内振荡的同时被放大。

固体激光器可产生各种不同宽度的脉冲激光。最普通的自由振荡过程为:闪光灯产生 10^{-3}s 宽度的光脉冲,在工作物质中建立反转粒子数和在谐振腔中为光振荡创造条件。在光泵浦开始工作之后经过一段时间开始振荡,它一直延续到闪光灯的光强不足以维持振荡所需的最小值时为止。

以自由振荡方式工作的激光器所输出的激光脉冲有着复杂的时间结构。它由 $50 \sim 100$ 个宽度为 10^{-6}s 的单个脉冲(峰)组成。峰间的间隔为 $3 \times 10^{-5} \sim 10^{-6} \text{s}$ 。改变组成谐振腔的反射镜形状可改变峰随时间的紊乱分布而转到有规则的分布甚至变为光滑的脉冲。

在固体激光器自由振荡时,只有很少的粒子处于受激状态,相对单脉冲输出能量为焦耳级的固体激光器而言,对应的峰值功率仅有 10^4 W 。如果使工作物质中大部分粒子都达到受激状态后再使之输出,则激光器输出功率可提高几个数量级。因此有时候必须先破坏谐振腔的振荡条件,然后使工作物质中所有粒子都达到受激状态,即在泵浦开始后 $2 \times 10^{-2} \text{ s}$ 恢复。这就是激光器调 Q 工作的思路,所采用的措施常称调 Q 或 Q 开关技术,现在常用的调 Q 方法有电光法和饱和吸收体法等。

电光 Q 开关是利用有些物质在电场作用下会发生的人工双折射现象进行控制的。此时在激光器的谐振腔内插入一个由电光晶体(如 $\text{KD}^* \text{P}$ 或 LiNbO_3 等)做成的普克尔盒和一个偏振棱镜,构成电光 Q 开关。该种开关是主动式开关,它可待光激励使工作物质的粒子反转数积累到相当大的数值时,主动地突然加上电场,使激光产生。其主要优点是开关速度快,可达 10^{-9} s 的量级,且发射激光的时间可以精确地用电子学方法控制。

若利用某些物质的透明度随光强的增加而增加的特点,并将该种物质插入激光器的谐振腔内,就可构成被动式 Q 开关。此时在激光工作物质发出的荧光和受激辐射达到一定的强度时,饱和吸收物质变为透明,从而突发性地产生激光巨脉冲。这种现象称为饱和吸收,这一类物质叫做饱和吸收体。当然,这里所用的饱和吸收物质必须满足一定的条件。

利用 Q 开关技术可获得输出能量达百焦耳,脉宽达到 $10^{-8} \sim 10^{-9} \text{ s}$ 的巨脉冲。激光脉冲宽度的定义是当输出功率降为峰值一半时对应的时间,如图 1-1 中的 t_p 。这种激光脉冲对材料的作用与自由振荡激光器光脉冲的作用有许多差别。

在谐振腔内安装一些附加装置,通过它们的影响,使频率差相等的各纵模保持固定的相位关系,即将各纵模的相位关系强行锁定,这就叫锁模,又称锁相。各纵模的相位被锁定后,就满足相干光的相位差恒定的条件,当它们叠加时将产生干涉加强,从而使输出激光波形为一系列脉宽极窄的周期脉冲,此时输出的激光脉宽达