



全国高技术重点图书·激光技术领域

激光辐照效应

孙承伟 主编

陆启生 范正修 陈裕泽 李成富 关吉利 关崇文 编著

国防工业出版社

646

71.20
5/6

激光辐照效应

孙承纬 主编
陆启生 范正修 陈裕泽
李成富 关吉利 关崇文 编著

国防工业出版社

·北京·

图书在版编目(CIP)数据

激光辐照效应/孙承纬主编. —北京:国防工业出版社, 2002.1

全国高技术重点图书·激光技术领域

ISBN 7-118-02541-0

I. 激... II. 孙... III. 激光—辐照效应—研究
IV. TN241

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 23182 号

国防工业出版社 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号)

(邮政编码 100044)

北京奥隆印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 850×1168 1/32 印张 15 $\frac{1}{4}$ 395 千字

2002 年 1 月第 1 版 2002 年 1 月北京第 1 次印刷

印数:1-3000 册 定价:29.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

《全国高技术重点图书》 出版指导委员会

主 任 朱丽兰

副主任 刘 果 卢鸣谷

委 员 (以姓氏笔划为序)

王大中 王为珍 王守武 牛田佳

卢鸣谷 叶培大 刘 仁 刘 果

朱丽兰 孙宝寅 师昌绪 任新民

杨牧之 杨嘉墀 陈芳允 陈能宽

张兆祺 张钰珍 张效祥 罗见龙

周炳琨 欧阳莲 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

主 任 陈能宽

委 员 杜祥琬 俞大光 于 敏 陈佳洱

干福熹 刘 仁 王乃彦 史国成

序 言

激光是一种高亮度的定向能束,单色性好,发散角很小,广泛应用于信息、医学、工业和军事技术各个部门。激光应用的一个重要基础是激光与物质的相互作用,特别是激光辐照于介质、材料、器件、结构物和生物体所引起的各种力学、物理、化学和生物学效应。这是一个随着激光器的发明而产生、发展的新兴领域,是力学、物理、材料科学、光电子学和医学工程之间的一门交叉学科。

目前已出版的一些激光辐照效应专著,阐述了这门学科的现象和应用,大多与激光加工及材料表面处理、改性技术有关,但还少有如本书这样学科基础深厚、对激光效应应用的阐述系统而又明确的论著。本书论述激光作为一种能束对物质的宏观效应及相互作用机理,基本不涉及非线性光学或其他微观效应,主要研究激光对介质(包括等离子体)、结构材料和光学材料、光电探测器件、基本结构物和生物体的热学与力学效应,系统地阐述了当代激光辐照效应领域中的理论和实验结果,总结了十多年来中国工程物理研究院、中国科学院、航天总公司和有关高等学校的科学家们在国家高技术 863 计划激光技术领域的支持下所获得的研究成果。本书的特点是概念准确、理论严谨、充分反映了本领域的近代进展。全书系统明晰,且各章又有独自的主题和范围,可以分开阅读。

1986 年在邓小平同志亲自关怀下启动的国家高技术 863 计划,即将完成原定的研究目标,进入更新的发展阶段。本书是高技术激光科技丛书的一种,为今后激光辐照效应的深入研究及实际

应用提供了重要的参考和指导。我更瞩目于正在本领域开拓进取的青年科技人员,希望他们勇攀高峰,让高科技事业根深叶茂,在新世纪取得更大的进展。

杜祥琬

前 言

激光辐照效应是指激光束照射宏观介质、材料、结构物、光学器件、光电探测器件和生物体所产生的各种响应和效果,亦即所引起的力学、物理、化学和生物学的变化。这是一个学科门类广泛、综合性强的技术科学领域,是激光技术各种实际应用的基础和桥梁,是发展激光器、激光加工、激光军事应用、激光聚变、激光安全防护、激光医疗和生物工程等高新技术必须考虑的重要问题。

1960 年世界上第一台红宝石激光器发明之时,就已演示了聚焦激光束烧穿刀片的效果,显示了激光束在机械加工方面的巨大潜力,随之迅即开展了以激光辐照效应为基础的各种激光应用研究。1965 年苏联学者提出了激光维持的爆轰波的重要概念,1971 年美国出版了激光辐照效应的第一部专著。20 世纪 70 年代是激光效应研究继续深入并取得重大进步的时期,激光加工技术趋于成熟,激光武器杀伤机理的探索有了重要进展。八九十年代激光效应研究的重点是光学和光电探测器件的激光损伤、集成电路制造、无损检测、激光与等离子体的相互作用、激光惯性约束聚变、激光医疗等技术有关的应用问题,推动了激光技术在科学实验、国防科技和国民经济中的广泛应用,取得大量实际成果。

我国激光效应研究起步较早,在激光加工技术应用中成绩显著,已成为各工业部门主要的生产手段之一。尤其是改革开放以来,在国家高技术 863 计划的重点支持下,国内有关研究所和高等学校对激光辐照效应进行了系统的基础和应用研究,建立了一支年青的技术队伍,组织了这个领域系列性的学术会议,发表了大量论文,研究工作水平得到很大的提高,为国民经济和国防高技术的发展做出了贡献。

编著本书的目的是对国内有关研究工作的基础作一个系统的整理和总结,以利于今后对从事激光效应研究的青年科技人员的培养,并进一步推动有关课题研究水平的提高。国外已经出版的若干专著在专业深度和与实际应用结合等方面尚感不足,本书的特点是把各种激光效应的本质物理现象和有关基础学科结合,作为全书的构架,使得效应的研究能够建立在较深的专业知识基础上。本书很多内容是作者们的研究成果,许多章节是以前激光效应专著中没有包括的较深入的课题。本书编著过程中大量调研了国内外的专业文献资料,充分反映了激光效应研究的最新进展。

由于本书的范围主要是激光辐照的宏观效应,不深入讨论微观层次的激光与物质相互作用(如非线性光学),书中关于激光与等离子体相互作用的阐述也仅限于把等离子体看作一种介质的行为,仅仅为了适合本书系统性的需要,并不涉及激光聚变或 X 射线激光的高深物理内容。激光对生物体的效应是相当复杂的现象,目前还没有上升到理论认识的程度,但其实际应用十分重要,为此本书包括了这方面的内容,并注重于这些现象与主要物理效应的联系。

本书共分九章。绪论概述了激光辐照效应研究的意义、主要内容和应用,第一、二、三章相继阐述物质对激光的吸收与反射特性、激光对固体材料的热效应以及激光气化与烧蚀引起的力学效应,都由孙承纬撰写。第四章简述激光与等离子体相互作用的基本概念,由关吉利撰写。第五章论述激光加热作用下材料力学性能的变化、激光热应力和结构失效的主要概念,由陈裕泽、尹益辉和唐志平撰写。第六章和第七章研究光学材料、元件和薄膜的激光损伤与破坏,分别由李成富、李仲伢和范正修撰写。第八章专论半导体材料和光电探测器件受激光束干扰和损伤的物理机制,由陆启生撰写。第九章介绍了激光束对生物体效应的主要概念,由关崇文和雷仕湛撰写。全书由孙承纬负责统编。

本书的编写得到了以杜祥琬院士为首的国家高技术 863 计划激光技术领域专家组的支持,并为之作序,陈能宽院士指导了本书

的编写。专家组办公室、国防工业出版社和中国工程物理研究院流体物理研究所对本书的出版给予很大帮助和支持。赵剑衡、陶洁贞、罗福、陆向阳等同志承担了本书稿件繁重的打印、制图工作。作者们谨向为本书出版做出贡献的同志们表示衷心的感谢。

本书是从事激光辐照效应研究和应用人员的基础性、前沿性参考书,也可供有关专业的教师 and 研究生阅读,为开拓激光技术应用的新思路和新领域服务。本书覆盖面广,内容新颖,但是作者们才疏学浅,错误不当之处在所难免,尚祈读者指正。

孙承纬

目 录

绪论	1
第一章 物质对激光的反射和吸收	6
1.1 金属和电介质对激光反射与吸收的经典电磁理论	7
1.2 物质光学特性的微观理论	12
1.3 温度和表面状况对金属光学特性的影响	18
1.4 激光能量的吸收和转化	24
参考文献	27
第二章 激光对固体材料的热效应	28
2.1 材料的热物理性质	28
2.2 激光加热下物体的温度场	32
2.2.1 热传导方程和定解条件	32
2.2.2 半无限厚物体的温度场	33
2.2.3 有限厚度广延板块的温度场	37
2.2.4 激光加热的问题和应用	40
2.2.5 非傅里叶热传导问题	42
2.3 激光引起材料的熔化	44
2.3.1 固-液态界面的移动速度	44
2.3.2 有限直径激光束照射下材料的熔化	47
2.3.3 材料的深层熔化	51
2.3.4 液态质量迁移	53
2.3.5 材料金相结构的变化和破坏	55
2.4 激光引起材料的气化和烧蚀	55
2.4.1 材料激光气化的物理机制	55
2.4.2 定态气化和质量迁移	57

2.4.3 材料的激光烧蚀	65
2.4.4 激光与金属材料的热耦合	72
参考文献	76
第三章 激光气化和烧蚀引起的力学效应	79
3.1 靶蒸气等离子体的气体动力学运动	79
3.1.1 激光气化下靶蒸气的平面一维定常流动	79
3.1.2 激光照射下透明蒸气的平面一维不定常流动	85
3.1.3 激光照射下等离子体的平面一维流动	89
3.2 靶蒸气和环境气体对激光的吸收	92
3.2.1 靶蒸气对连续激光的吸收和发生电离	92
3.2.2 激光作用下环境气体的光学击穿	94
3.2.3 激光吸收区的形成	98
3.3 激光维持的燃烧波(LSC)和爆轰波(LSD)	101
3.3.1 激光吸收波传播的气体动力学分析	101
3.3.2 激光维持的燃烧波(LSC)	103
3.3.3 激光维持的爆轰波(LSD)	110
3.4 激光烧蚀压力和激光与靶的冲量耦合	121
3.4.1 透明蒸气的压力和冲量耦合	121
3.4.2 气体环境中 LSD 波引起的压力和冲量耦合	126
3.4.3 真空环境中激光烧蚀等离子体的压力和 冲量耦合	131
3.4.4 激光与体吸收材料的冲量耦合	141
3.5 激光等离子体力学效应的应用	143
3.5.1 激光冲击硬化	144
3.5.2 激光驱动高速飞片(层)	145
3.5.3 激光引起靶材内的冲击波和动态断裂	148
参考文献	151
第四章 激光与等离子体的相互作用	155
4.1 等离子体的特性和产生机制	155
4.1.1 等离子体的特性	155

4.1.2	激光等离子体的产生机制	158
4.1.3	碰撞电离	160
4.2	激光在等离子体中的传播和吸收	162
4.2.1	激光在等离子体中的传播	162
4.2.2	等离子体对激光的吸收	168
4.3	晕区中激光与等离子体的相互作用	170
4.3.1	参量衰变不稳定性	172
4.3.2	受激布里渊散射	174
4.3.3	受激拉曼散射	177
4.3.4	双等离子体衰变不稳定性	180
4.3.5	成丝不稳定性	183
4.4	激光等离子体的实验和诊断技术	183
4.4.1	激光与等离子体非线性相互作用实验	184
4.4.2	Thomson 散射	185
4.4.3	X 射线谱	187
4.4.4	光学干涉仪	188
	参考文献	189
第五章	激光辐照下材料和结构的响应及失效	191
5.1	材料力学性能的温度相关性	191
5.1.1	短时高温实验方法	191
5.1.2	温度对材料弹性模量的影响	193
5.1.3	温度和升温率对材料屈服强度的影响	196
5.1.4	温度和升温率对材料抗拉强度的影响	199
5.1.5	高温下材料力学行为的本构描述	201
5.2	激光热应力	202
5.2.1	热力耦合理论的基本方程组	202
5.2.2	解耦理论与热弹性 Navier 方程	205
5.2.3	短脉冲激光辐照引起的热弹性波	206
5.2.4	金属镜面的激光辐照破坏	213
5.2.5	激光热弹性波在无损检测中的应用	224

5.3 短脉冲激光辐照下板的热弹性响应	229
5.3.1 板的热弹性基本方程组	230
5.3.2 激光辐照下板的动力响应	235
5.4 激光辐照下典型结构的失效	242
5.4.1 受拉和受压板件的激光辐照破坏	243
5.4.2 受轴压和受内压柱壳的激光辐照破坏	254
参考文献	260
第六章 光学元件的激光损伤	263
6.1 光学元件激光损伤的基本问题	264
6.1.1 光学元件激光损伤的定义和作用方式	264
6.1.2 激光损伤的实验监测和检测 [JY]	267
6.2 光学元件激光损伤的基本现象	270
6.2.1 激光参数对光学元件激光损伤的影响	270
6.2.2 光学材料物理性质对激光损伤的影响	278
6.3 光学材料激光损伤的机理	280
6.3.1 本征吸收和热损伤	280
6.3.2 自聚焦效应	281
6.3.3 电子崩和多光子电离	282
6.3.4 杂质缺陷、超声波和非线性吸收	285
6.4 提高光学材料抗激光损伤强度的技术	287
参考文献	291
第七章 光学薄膜的激光损伤和破坏	293
7.1 光学薄膜的光学性质及其与激光破坏的关系	293
7.1.1 光学薄膜的性质和种类	293
7.1.2 光学薄膜对激光的吸收和散射	306
7.1.3 光学薄膜的驻波场和温度场	307
7.2 光学薄膜的制备技术及其对激光损伤的影响	314
7.2.1 物理气相和溅射沉积技术	315
7.2.2 离子镀膜技术	317
7.2.3 化学气相沉积(CVD)	318

7.2.4 溶胶-凝胶技术	320
7.3 光学薄膜激光破坏的实验研究	321
7.3.1 光学薄膜激光破坏的定标律和累积效应	321
7.3.2 激光束光斑尺寸和薄膜杂质缺陷的影响	323
7.3.3 薄膜厚度和基体特性对薄膜激光破坏的影响 ...	324
7.4 光学薄膜激光破坏阈值的测量和抗激光增强技术 ...	325
参考文献	334
第八章 激光与光电探测器的相互作用及效应	336
8.1 常用光电探测器的基本类型与工作原理	336
8.1.1 半导体的光电效应	336
8.1.2 光导和光伏型光电探测器的工作原理	341
8.1.3 电荷耦合型光电探测器(CCD)的工作原理	349
8.2 半导体材料对激光的吸收与相互作用	356
8.2.1 半导体材料对激光的吸收	356
8.2.2 半导体中相干受激光散射过程	364
8.2.3 光电探测器内激光能量的转换	369
8.3 激光辐照光电探测器的光学效应	371
8.3.1 光电探测器的饱和效应和记忆效应	371
8.3.2 激光系统的混沌	381
8.3.3 激光对光电探测器的干扰	387
8.3.4 光电探测器中的光电子输运混沌	390
8.4 激光辐照光电探测器的热学效应	398
8.4.1 激光辐照下光电探测器的温升	399
8.4.2 光电探测器输出信号的热瞬变(弛豫)现象	402
8.4.3 光电探测器的热损伤(性能退化)和熔凝损伤 ...	406
8.4.4 光电探测器的局部破坏效应	408
8.5 激光辐照光电探测器的力学效应	412
8.5.1 激光辐照光电探测器产生的热应力	412
8.5.2 激光维持的爆轰波(LSD)与光电探测器的 相互作用	416

8.5.3 光学-力学的相干耦合效应	418
参考文献	422
第九章 激光辐照对生物体的效应	426
9.1 人体皮肤、生物组织及眼睛的光学性质	426
9.1.1 人体皮肤的结构和光学性质	427
9.1.2 色素、水和血液的光学性质	433
9.1.3 眼睛的光学性质	436
9.2 激光辐照对生物体的损伤	439
9.2.1 激光辐照损伤人体和动物的特点	439
9.2.2 激光辐照参数对生物体损伤的影响	444
9.3 激光辐照对生物体效应的机理	447
9.3.1 激光加热作用	447
9.3.2 激光生物化学作用	453
9.3.3 光致压力作用	458
9.3.4 激光强电场的作用	460
9.3.5 弱激光对生物体的刺激作用	462
9.4 激光在精密生物技术和医疗技术中的应用	464
9.4.1 激光超微和超快技术	464
9.4.2 新型激光的应用	466
参考文献	468

绪 论

激光与物质相互作用泛指激光束辐照各种介质、材料和结构物(统称靶物质)所发生的物理、化学、生物等现象的研究领域,这里包括激光辐照产生的效应(如光学、电磁学、热学、力学和生物学效应等),以及发生了物理、化学变化的靶物质或周围气体对入射、透射激光束传输和吸收特性产生的反作用。

激光与物质相互作用包括许多研究分支,通常专指在激光作为单色纯能量束对物质作用的意义下发生的效应和现象。这些现象涉及的激光波长范围从红外到真空紫外波段,时间结构包括连续、重复率和脉冲(准连续及单脉冲),作用时间从亚纳秒至数小时,靶面上激光能量和功率密度的范围分别为 $10^{-6} \sim 10^{12} \text{ J/cm}^2$ 、 $10^{-6} \sim 10^{20} \text{ W/cm}^2$ 。本书不涉及非线性光学、光电效应等内容。激光束入射于靶物质后发生的主要物理现象,可归结为它的热和力学效应,其主要研究内容和方向可分为物质对激光的反射、吸收和能量转化,激光对材料和结构的加热、熔化、气化和相关的力学效应及等离子体现象,激光对电介质(包括光学材料和光学薄膜)和半导体的损伤及破坏等,这是本书阐述的主要内容,如图 0.1 所示。

激光在材料表面的反射和吸收同激光波长、光强、材料性质及表面状况有关。入射激光能量通过逆韧致过程在材料表面趋肤深度内部分被吸收,并在亚纳秒时间内转化为热能。激光加热使材料升温,发生热扩散、热膨胀和热应力,可能使脆性材料破碎。升温 and 热应力也是激光干扰及损伤光电探测器件的重要原因。

受到激光辐照后光电探测器性能暂时性下降,称为光电探测器的激光致眩,永久性下降或完全失效称为激光致盲。光电探测器正常工作时,接收信号光后激发出可导电的光电子和空穴,改变

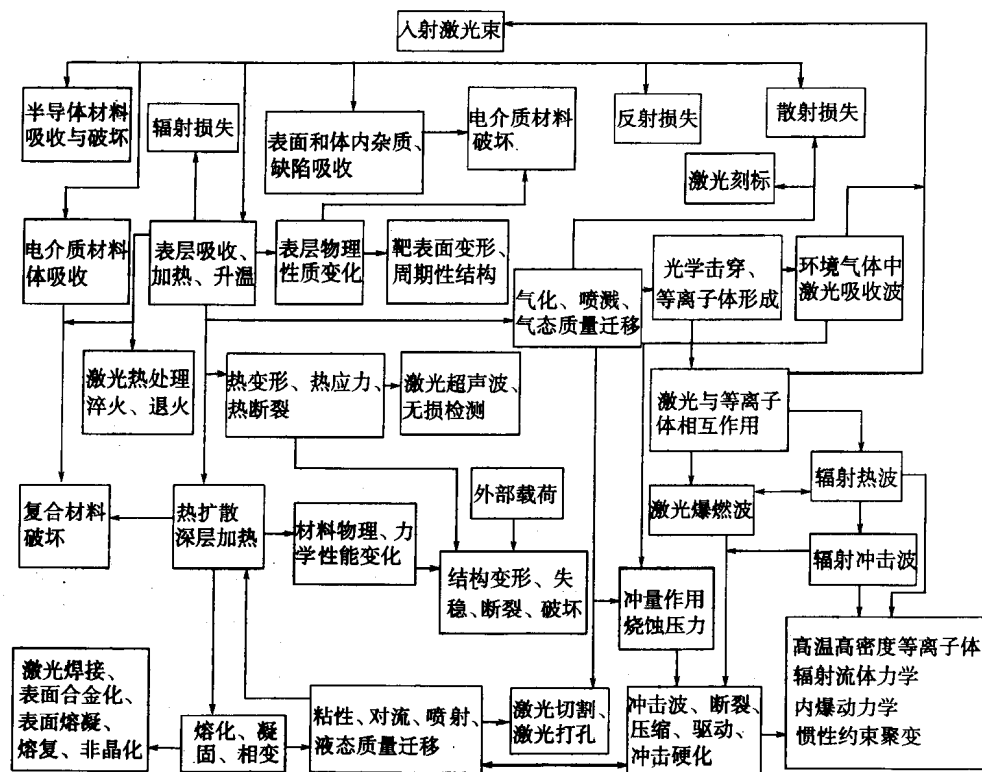


图 0.1 激光的热和力学效应及其应用