

“十四五”时期国家重点出版物出版专项规划·重大出版工程规划项目



变革性光科学与技术丛书



Laser Effects and Engineering Applications

激光效应与工程应用

韩敬华 冯国英 何长涛 著

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书针对激光与物质相互作用的基础理论、效应机理、前沿应用等问题进行了概述和凝练,展示了激光在精密制造、快速清洗、环境保护、激光系统元件应用等领域的前沿成果。本书主要内容包括飞秒激光特性及加工优势激光及等离子体清洗、等离子体光谱对界面检测、激光诱导光学材料损伤等。本书从激光与物质相互作用的基本原理出发,针对不同的激光参数和材料类型,对激光作用过程和效应进行理论分析、机理研究、仿真模拟、实验验证、并建立了相应的物理模型。在理论研究的基础上,对激光作用效应进行了归纳,并对其应用的领域及其优势进行了总结和归纳。本书的研究方法、物理模型和应用分析都为激光效应的研究和应用提供参考。

本书可以作为理工类大学高年级本科生及研究生教材,以及从事激光相关技术人员的参考资料。

版权所有,侵权必究。举报:010-62782989, beiqinquan@tup.tsinghua.edu.cn。

图书在版编目(CIP)数据

激光效应与工程应用/韩敬华,冯国英,何长涛著. —北京:清华大学出版社,2023.5
(变革性光科学与技术丛书)
ISBN 978-7-302-62369-4

I. ①激… II. ①韩… ②冯… ③何… III. ①激光技术 ②激光应用 IV. ①TN24

中国国家版本馆 CIP 数据核字(2023)第 012946 号

责任编辑:鲁永芳

封面设计:意匠文化·丁奔亮

责任校对:欧 洋

责任印制:杨 艳

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座 邮 编:100084

社 总 机:010-83470000

邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质量反馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 装 者:小森印刷(北京)有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:170mm×240mm 印 张:27.5

字 数:521 千字

版 次:2023 年 5 月第 1 版

印 次:2023 年 5 月第 1 次印刷

定 价:229.00 元

产品编号:094424-01

丛书编委会

主 编

罗先刚 中国工程院院士,中国科学院光电技术研究所

编 委

周炳琨 中国科学院院士,清华大学

许祖彦 中国工程院院士,中国科学院理化技术研究所

杨国桢 中国科学院院士,中国科学院物理研究所

吕跃广 中国工程院院士,中国北方电子设备研究所

顾 敏 澳大利亚科学院院士、澳大利亚技术科学与工程院院士、
中国工程院外籍院士,皇家墨尔本理工大学

洪明辉 新加坡工程院院士,新加坡国立大学

谭小地 教授,北京理工大学、福建师范大学

段宣明 研究员,中国科学院重庆绿色智能技术研究院

蒲明博 研究员,中国科学院光电技术研究所

清华大学出版社

丛书序

光是生命能量的重要来源,也是现代信息社会的基础。早在几千年前人类便已开始了对光的研究,然而,真正的光学技术直到 400 年前才诞生,斯涅耳、牛顿、费马、惠更斯、菲涅耳、麦克斯韦、爱因斯坦等学者相继从不同角度研究了光的本性。从基础理论的角度看,光学经历了几何光学、波动光学、电磁光学、量子光学等阶段,每一阶段的变革都极大地促进了科学和技术的发展。例如,波动光学的出现使得调制光的手段不再限于折射和反射,利用光栅、菲涅耳波带片等简单的衍射型微结构即可实现分光、聚焦等功能;电磁光学的出现,促进了微波和光波技术的融合,催生了微波光子学等新的学科;量子光学则为新型光源和探测器的出现奠定了基础。

伴随着理论突破,20 世纪见证了诸多变革性光学技术的诞生和发展,它们在一定程度上使得过去 100 年成为人类历史长河中发展最为迅速、变革最为剧烈的一个阶段。典型的变革性光学技术包括激光技术、光纤通信技术、CCD 成像技术、LED 照明技术、全息显示技术等。激光作为美国 20 世纪的四大发明之一(另外三项为原子能、计算机和半导体),是光学技术上的重大里程碑。由于其极高的亮度、相干性和单色性,激光在光通信、先进制造、生物医药、精密测量、激光武器乃至激光核聚变等技术中均发挥了至关重要的作用。

光通信技术是近年来另一项快速发展的光学技术,与微波无线通信一起极大地改变了世界的格局,使“地球村”成为现实。光学通信的变革起源于 20 世纪 60 年代,高琨提出用光代替电流,用玻璃纤维代替金属导线实现信号传输的设想。1970 年,美国康宁公司研制出损耗为 20 dB/km 的光纤,使光纤中的远距离光传输成为可能,高琨也因此获得了 2009 年的诺贝尔物理学奖。

除了激光和光纤之外,光学技术还改变了沿用数百年的照明、成像等技术。以最常见的照明技术为例,自 1879 年爱迪生发明白炽灯以来,钨丝的热辐射一直是最常见的照明光源。然而,受制于其极低的能量转化效率,替代性的照明技术一直是人们不断追求的目标。从水银灯的发明到荧光灯的广泛使用,再到获得 2014 年诺贝尔物理学奖的蓝光 LED,新型节能光源已经使得地球上的夜晚不再黑暗。另外,CCD 的出现为便携式相机的推广打通了最后一个障碍,使得信息社会更加丰

富多彩。

20 世纪末以来,光学技术虽然仍在快速发展,但其速度已经大幅减慢,以至于很多学者认为光学技术已经发展到瓶颈期。以大口径望远镜为例,虽然早在 1993 年美国就建造出 10 m 口径的“凯克望远镜”,但迄今为止望远镜的口径仍然没有得到大幅增加。美国的 30 m 望远镜仍在规划之中,而欧洲的 OWL 百米望远镜则由于经费不足而取消。在光学光刻方面,受到衍射极限的限制,光刻分辨率取决于波长和数值孔径,导致传统 i 线(波长为 365 nm)光刻机单次曝光分辨率在 200 nm 以上,而每台高精度的 193 光刻机成本达到数亿元人民币,且单次曝光分辨率也仅为 38 nm。

在上述所有光学技术中,光波调制的物理基础都在于光与物质(包括增益介质、透镜、反射镜、光刻胶等)的相互作用。随着光学技术从宏观走向微观,近年来的研究表明:在小于波长的尺度上(即亚波长尺度),规则排列的微结构可作为人造“原子”和“分子”,分别对入射光波的电场和磁场产生响应。在这些微观结构中,光与物质的相互作用变得比传统理论中预言的更强,从而突破了诸多理论上的瓶颈难题,包括折反射定律、衍射极限、吸收厚度-带宽极限等,在大口径望远镜、超分辨成像、太阳能、隐身和反隐身等技术中具有重要应用前景。譬如,基于梯度渐变的表面微结构,人们研制了多种平面的光学透镜,能够将几乎全部入射光波聚集到焦点,且焦斑的尺寸可突破经典的瑞利衍射极限,这一技术为新型大口径、多功能成像透镜的研制奠定了基础。

此外,具有潜在变革性的光学技术还包括量子保密通信、太赫兹技术、涡旋光束、纳米激光器、单光子和单像元成像技术、超快成像、多维度光学存储、柔性光学、三维彩色显示技术等。它们从时间、空间、量子态等不同维度对光波进行操控,形成了覆盖光源、传输模式、探测器的全链条创新技术格局。

值此技术变革的肇始期,清华大学出版社组织出版“变革性光科学与技术丛书”是本领域的一大幸事。本丛书的作者均为长期活跃在科研第一线,对相关科学和技术的历史、现状和发展趋势具有深刻理解的国内外知名学者。相信通过本丛书的出版,将会更为系统地梳理本领域的技术发展脉络,促进相关技术的更快发展,为高校教师、学生以及科学爱好者提供沟通 and 交流平台。

是为序。

罗先刚

2018 年 7 月

序

激光是 20 世纪以来,继计算机、原子能及半导体之后,人类的第四项重大发明。从基础研究到工程实践,从特性研究到应用推广,无不凝结了全球顶级科学家、工程师和企业家的努力和汗水。激光技术的发展,使得激光器从笨重走向轻巧、从娇贵走向稳定,不断追求更高功率、更高能量、更优的光束质量及更短脉冲,这些都为激光技术的应用和普及提供了支撑,推动了人类科技的飞速发展,极大促进了新的产业革命。借助于超短激光脉冲,人们得以一窥化学反应和生物反应的过程;依靠超强超快脉冲,人们开拓了强场物理的研究,得以研究宇宙的演化规律;依靠激光器的推广,使得传统制造行业得到改造和升级,从加工清洗、切割、焊接等普适技术,到 3D 打印技术、生物手术,再到微纳制造领域,催生了大量新型产业的出现和飞速发展。激光的发展使得古老的光学获得了新生,为人类打开一扇扇新的科学大门,推动了现代科学技术的迅猛发展,同时促进人类文明的进步。

本书由韩敬华主持撰写,作者所在的四川大学激光微纳工程研究所长期从事激光效应以及激光智能设备的相关研究,为国防科技、企业技术服务等做出了很大的贡献。本书是所做研究工作的概述和凝练,内容包括激光与物质相互作用的机理、飞秒激光的特性及作用效应、激光除漆、激光等离子体的光谱特性及其在环境中的应用、激光等离子体清洗微纳颗粒、激光诱导损伤等,都属于科学研究和工程应用的前沿问题。作者按照理论分析、作用效应概述、作用效果预判和推广的逻辑顺序进行撰写,对整个激光过程进行深入浅出的阐述,力求知识的系统化,使读者容易理解和掌握。

本书作者长期从事激光与物质相互作用的相关科研工作,对激光效应的理论研究和成果转化具有较深刻的认识。本书选题新颖、内容丰富,凝练了作者十几年的研究成果。本书介绍的研究方法和成果,对从事激光效应相关研究的科研人员和工程师有一定的借鉴价值和指导意义。

中国工程院院士 中国工程物理研究院研究员 范国滨

2022 年 12 月

清华大学出版社

前言

激光束独有的特征以及激光技术的发展,使得激光在各领域得到越来越广泛的应用,其中激光与物质相互作用领域属于激光应用的一个重要方向。激光与物质相互作用以及辐照效应等方面的发展日新月异,相应成果也越来越广泛地应用到军事、工业制造等方面,极大地推动了我国现代科技的发展和建设。

本书是作者从事激光与物质相互作用研究成果的提炼,以及教学实践经验的总结。本书的主要特点如下:一是注重基于物理理论的激光与物质相互作用过程的物理图像的建立,帮助读者构建完善且正确的物理知识体系;二是注重物理理论与激光作用效应及应用的有机融合,有利于培养读者从知识的掌握到应用的能力;三是注重历史的发展渊源与前沿学术知识的融合,使读者更容易梳理激光效应与应用的研究脉络和思路。本书的主要内容安排如下:第1章介绍激光技术的发展与应用;第2章介绍飞秒激光的特性及作用效应;第3章介绍激光除漆的机理、参量控制和优化;第4章介绍激光等离子体清洗微纳颗粒;第5章介绍激光等离子体光谱特性及其在环境中的应用;第6~7章介绍激光诱导损伤的相关研究。其中第2章部分内容冯国英教授撰写,其他部分均由韩敬华副教授撰写,本书中关于激光损伤图像的处理以及部分数值模拟等工作由何长涛博士完成。

本书是一本激光技术领域的基础性和前沿性的专业书籍,涉及的内容较宽,努力涵盖微观分析、宏观效应及应用,相信本书可以为具有一定物理基础的高年级本科生、研究生与广大科技工作者提供有效的参考和指导。本书在撰写过程中得到了同事和研究生的大力支持和帮助。刘锴、赖秋宇、富星桥、丁坤艳、张丽君、江洁、黄泽宇、李世杰等研究生在文稿整理等方面做了大量工作,陈强坤、游若浠、任梦宇和袁晨源协助完成教学用PPT课件,在此一并表示衷心感谢。

本书得到了国家重点研发计划、国家自然科学基金(No. U2030108),四川省科技厅项目(No. 2021YFSY0027)以及“四川大学建设教材”项目资助。由于作者水平有限,本书难免存在不足和错误之处,恳请读者谅解并敬请批评指正,不胜感激。

韩敬华 冯国英 何长涛

2022年6月于四川大学

清华大学出版社

目 录

第 1 章 激光效应及工程应用概论	1
1.1 引言	1
1.2 光的本质特性	2
1.2.1 光的意义	2
1.2.2 光的产生	2
1.2.3 光的本质	2
1.2.4 光的波粒二象性	3
1.3 激光技术的发展	4
1.3.1 激光技术国外发展史	5
1.3.2 激光技术在国内的发展	8
1.4 激光的基本特性	9
1.4.1 激光的基本特性及应用	9
1.4.2 激光束参量描述	9
1.5 典型激光器	12
1.5.1 固体激光器	13
1.5.2 气体激光器	15
1.5.3 光纤激光器	15
1.5.4 半导体激光器	16
1.5.5 自由电子激光器	16
1.5.6 高峰值功率激光系统	17
1.6 激光波动描述及物质线性响应	18
1.6.1 材料对激光的宏观描述	19
1.6.2 激光传输的电磁理论描述	20
1.6.3 材料对激光响应的微观描述	22
1.6.4 材料特性对激光的响应规律	23

1.6.5 散射效应	25
1.7 激光量子描述及电离效应	26
1.7.1 线性电离(单光子电离)效应	26
1.7.2 非线性电离效应	27
1.8 激光等离子体效应	29
1.8.1 等离子体	29
1.8.2 激光等离子体的产生	30
1.8.3 激光等离子体的作用效应	30
1.9 激光技术应用简介	32
1.9.1 激光化学	33
1.9.2 激光医疗	33
1.9.3 超快超强物理	35
1.9.4 激光加工	36
1.9.5 激光探测	37
1.9.6 军事应用	39
1.10 总结	39
参考文献	40
第2章 飞秒激光特性及作用效应	46
2.1 引言	46
2.2 飞秒激光技术	47
2.2.1 脉宽压缩和能量提升技术	47
2.2.2 典型的飞秒激光器	48
2.2.3 飞秒激光器的扩展	51
2.3 飞秒激光与物质相互作用的机理	51
2.3.1 飞秒激光与金属材料的相互作用机理	52
2.3.2 超短脉冲与金属作用的热力学模型	53
2.3.3 飞秒激光与电介质材料作用原理	54
2.4 飞秒激光脉冲微纳加工	60
2.4.1 飞秒激光去除机制	60
2.4.2 飞秒激光加工的优势	64
2.4.3 飞秒激光微加工的方法	66
2.4.4 飞秒微加工存在的问题	69

2.5	飞秒激光微孔制造与特性研究	70
2.5.1	需求背景	70
2.5.2	表面贴片法提高微孔加工质量	71
2.5.3	表面辅助薄膜法提高微孔加工质量	73
2.5.4	理论分析	77
2.5.5	小结	82
2.6	石英基底的微流体通道制造	82
2.6.1	研究背景	82
2.6.2	飞秒激光直写与化学腐蚀结合法	85
2.7	超短激光的前沿应用	89
2.7.1	超快领域	89
2.7.2	超强领域	90
2.7.3	超精细微加工领域	90
2.8	总结与展望	91
	参考文献	92
第3章	激光除漆的机理、参量控制和优化	102
3.1	需求背景	102
3.1.1	传统清洗方法	102
3.1.2	激光清洗的优势	102
3.1.3	激光清洗的分类和机理	103
3.2	激光除漆机理和效应	104
3.2.1	热力学效应	105
3.2.2	激光相变烧蚀效应	107
3.2.3	激光等离子体效应	108
3.2.4	声波震碎	108
3.2.5	光子压力	109
3.3	大气环境下激光除漆的参量优化和选择	109
3.3.1	激光参量选择的必要性	109
3.3.2	实验研究	110
3.3.3	理论研究	112
3.3.4	油漆去除最佳激光脉冲参数的确定	119
3.3.5	小结	122

3.4	激光湿法除漆的参量优化和选择	122
3.4.1	激光湿法除漆的特征	122
3.4.2	实验结果	122
3.4.3	理论分析	124
3.4.4	水中油漆的去除机制和条件	128
3.4.5	小结	131
3.5	飞机蒙皮多层漆的激光清洗机制及参量选择	131
3.5.1	飞机蒙皮清洗的必要性	131
3.5.2	实验研究	132
3.5.3	理论分析	140
3.5.4	飞机蒙皮分层可控激光清洗	146
3.5.5	小结	148
3.6	基于声光法的飞机蒙皮分层除漆复合监测	149
3.6.1	引言	149
3.6.2	基于光谱和声学的监测法	151
3.6.3	小结	158
3.7	总结	159
	参考文献	159
第4章	激光等离子体清洗微纳颗粒	165
4.1	引言	165
4.1.1	微纳颗粒污染的危害	165
4.1.2	传统的微纳颗粒清洗技术及其局限性	166
4.2	激光等离子体特性	167
4.2.1	激光等离子体的产生	167
4.2.2	激光等离子体冲击波的形成	167
4.2.3	激光等离子体冲击波理论模型	168
4.3	微纳颗粒与基底表面的吸附机理	170
4.3.1	吸附力类型	171
4.3.2	影响吸附力大小的因素	173
4.3.3	颗粒去除机理理论	174
4.3.4	小结	178
4.4	颗粒去除的影响因素和去除极限	178

4.4.1	实验研究	178
4.4.2	微纳颗粒清除粒径理论极限研究	179
4.4.3	激光等离子体压力的空间分布	181
4.4.4	微粒去除的激光工作条件	181
4.5	微纳颗粒清洗的空间效应	184
4.5.1	激光等离子体冲击波去除颗粒实验	184
4.5.2	等离子体清洗微纳颗粒的空间效应的理论研究	189
4.5.3	小结	194
4.6	微纳颗粒去除的热力学作用效应	195
4.6.1	颗粒特性的演化	195
4.6.2	微纳颗粒相变的理论分析	199
4.6.3	小结	203
4.7	激光等离子体去除微纳颗粒的基底损伤问题	203
4.7.1	颗粒诱导损伤坑形貌	204
4.7.2	基底损伤的理论研究	207
4.7.3	小结	212
4.8	微纳颗粒去除的极限问题	212
4.8.1	微纳颗粒清除残留极限	212
4.8.2	微纳颗粒清除极限的理论分析	217
4.8.3	小结	219
4.9	透明基底表面微纳颗粒激光清洗研究	219
4.9.1	透明光学元件基底表面颗粒杂质的危害	219
4.9.2	实验研究	220
4.9.3	理论分析	223
4.9.4	小结	230
4.10	总结	230
	参考文献	231
第 5 章 激光等离子体光谱特性及其在环境中的应用		236
5.1	引言	236
5.2	激光等离子体基本特性	237
5.2.1	等离子体电子温度和电子密度空间分布特性	238
5.2.2	自吸收特性	240

5.3	LIBS 技术用于元素分析	241
5.3.1	定性分析	241
5.3.2	半定量分析	242
5.3.3	定量分析	242
5.4	基于激光等离子体的油水分层溶液的厚度检测	242
5.4.1	实验装置	243
5.4.2	油水分层液面的等离子体电子密度和电子温度空间分布	244
5.4.3	特征峰选择	247
5.4.4	基于等离子体光谱法的油厚检测误差分析	252
5.5	等离子光谱法检测分层溶液厚度的方法	256
5.5.1	分层溶液特征元素和特征峰选择	256
5.5.2	光谱强度对上层溶液厚度表征理论推导	257
5.5.3	分层溶液厚度检测误差来源	259
5.5.4	小结	262
5.6	利用激光诱导等离子体快速光降解亚甲基蓝	262
5.6.1	工业需求	263
5.6.2	实验研究	263
5.6.3	光催化作用机理	269
5.6.4	降解效率的影响因素	270
5.6.5	激光能量对降解效果的影响	273
5.6.6	初始 H_2O_2 浓度的影响	273
5.7	总结	274
	参考文献	274
第 6 章	激光诱导光学材料损伤	281
6.1	引言	281
6.2	激光在光学材料的电离击穿、能量沉积及损伤问题	282
6.2.1	激光脉冲能量截断和沉积的机理	282
6.2.2	激光脉冲能量的空间沉积特性及诱导损伤特性	288
6.2.3	基于图像处理的激光诱导损伤特性自动识别	300
6.3	激光能量的直接沉积及诱导相爆炸研究	304
6.4	激光等离子体诱导玻璃损伤	312
6.4.1	激光等离子体特性	312

6.4.2	激光等离子体冲击波对玻璃前表面的冲击损伤	314
6.4.3	纳秒激光诱导熔石英后表面损伤及减缓方式	326
6.4.4	小结	337
6.5	激光诱导透明介质体损伤的形貌特性及机理研究	337
6.5.1	透明材料体损伤特征	337
6.5.2	实验研究	338
6.5.3	理论分析	341
6.5.4	基于损伤形貌的实验条件判断	352
6.5.5	小结	354
6.6	总结	354
	参考文献	355
第 7 章	激光诱导光学薄膜损伤	363
7.1	激光诱导光学薄膜损伤的相关理论	363
7.1.1	研究背景	363
7.1.2	激光诱导光学材料的损伤机理	363
7.1.3	激光诱导光学薄膜损伤的主要研究方法和结论	368
7.1.4	小结	370
7.2	杂质微粒诱导金属薄膜损伤特性	371
7.2.1	杂质诱导金属薄膜损伤	371
7.2.2	金属薄膜的激光损伤形貌	372
7.2.3	激光诱导薄膜损伤的理论分析	375
7.2.4	小结	381
7.3	杂质微粒诱导电介质薄膜损伤特性	381
7.3.1	杂质微粒	381
7.3.2	杂质微粒诱导薄膜损伤的机理	382
7.3.3	激光等离子体诱导薄膜损伤形貌	386
7.3.4	小结	388
7.4	激光等离子体诱导光学薄膜的损伤特性	388
7.4.1	激光等离子体对薄膜的损伤	388
7.4.2	激光等离子体诱导薄膜损伤特性	389
7.4.3	理论分析	395
7.4.4	小结	399

7.5 薄膜工艺对 Ta_2O_5 薄膜光电及激光损伤特性的影响	400
7.5.1 Ta_2O_5 薄膜特性	400
7.5.2 Ta_2O_5 薄膜的制备和原理	400
7.5.3 薄膜的微观特性	401
7.5.4 镀膜过程对薄膜特性的影响	403
7.5.5 小结	409
7.6 总结	409
参考文献	410
索引	416

第 1 章

激光效应及工程应用概论

1.1 引言

激光技术诞生于 20 世纪,是最重大、最实用的科技成就之一,现今更是最活跃的高新技术之一^[1-2]。激光技术是一门以原子理论、量子理论、光学技术、材料科学、电子技术等为基础的高新技术,被誉为 20 世纪四项重大发明之一(其他三项为计算机、原子能及半导体),被称为“最快的刀”“最准的尺”和“最亮的光”^[3-4]。自激光发明以来,以其方向性好、亮度高、单色性好、相干度高等独特优势,迅速吸引了人们的广泛关注,并逐步应用于农业生产、工业加工、环境治理与检测、生物医药、军用技术、新型制造、海洋航运、航天航空等诸多领域,带来了巨大的经济和科技效益^[5-7]。

激光应用装备系统包括以下几个基本部件:激光器、光束传输与脉冲控制系统、待加工/检测样品、设备控制系统、监控和诊断系统、安全防护系统等^[8],其中核心部件是激光器。激光器种类繁多,特性各异,为各种不同的需求背景提供了应用支撑。激光应用系统的关键技术包括激光光束的调整、聚焦和衰减,光路的设计和控制,激光参量的控制,光散射及烧蚀产物的安全防护,加工质量和烧蚀效果的监控系统,激光参量的自动反馈和控制系统等^[9]。激光应用系统的优化设计和运行,都建立在激光与物质相互作用效应的机理研究和定量分析基础上。

本章首先对光的本质特性、激光器发展和类型特性、主要应用领域进行了总结;其次,对激光与物质相互作用的基本理论进行了凝炼,为激光效应研究及工程应用的深入研究提供基础理论支撑。

1.2 光的本质特性

1.2.1 光的意义

世界万物离不开光,光属于大自然的恩赐。从人类的生活环境来看,从清晨第一缕阳光,到晚上的各种灯光,无时无刻不在照亮世界各个角落;从人类的生活需求来看,衣食住行都离不开光的贡献,光孕育了万物,丰富了世界,维持和推动了人类的发展和进步;从人类的心理需求来看,光代表希望,如巴金在其作品《灯》中提到“在这人间,灯光是不会灭的”,光明洗涤了多少人迷茫的心灵;从人类文明来看,光是世界上很多宗教所崇拜的对象,推动了人类文明的进步。中国古代神话中就有盘古开天辟地的故事,盘古用大斧把混沌的宇宙劈开,一分为二,他呼出的气息变成了风云,发出的声音化作了雷声,双眼变成了太阳和月亮,这体现了先祖伟大的开创精神;基督教的《圣经》说上帝创造世界用了七天,第一天首先创造了光,剩余的时间才创造了空气、陆地、海洋、动物和人等,这说明光是万物生存和发展的最基本要素。

光学的需要已经深入日常生活中衣食住行的各个方面,从生火做饭、燃放烟花爆竹、灯光照明、电影和舞台灯光设计等,都离不开光学技术的发展。以照明为例,从原始的火把、油灯、蜡烛,到近代的白炽灯、半导体照明灯、荧光灯等,都体现了科学技术的进步。随着人们对光本质认识的不断深入,有关光学和技术的应用在不断拓展。

1.2.2 光的产生

发光的形式很多,如日常生活中常见的热致发光(钨白炽灯)、化学发光(火柴燃烧是磷元素的着火点较低、易燃)、光致发光(夜明珠的发光、波短光激励发射、长波光发射)、电致发光(二极管发光、电击放电、闪电等)、等离子体发光等。从发光机理来看,光子发射是由电子能量降低辐射而产生,大致可以分为三类。第一类是电子处于自由态,如等离子体中高速运动的自由电子会因速度和动能的降低而发出光子,称为韧致辐射。由于电子动能前后变化具有随机性,相应辐射光子频率是连续分布的,属于连续光谱。第二类是自由电子被原子俘获,由自由态变为束缚态。电子初始动能具有随机性,虽然原子轨道确定,也属于连续光谱。第三类是束缚态电子在原子能级之间跃迁而辐射光子。由于原子的轨道一定,这样辐射光的波长也具有特定性,呈现线状光谱。

1.2.3 光的本质

对光本质的认识,我们古代已有了很多有价值的研究成果:早在两千五百多

年前的春秋战国时期,《墨经》里就出现了对“小孔成像”的记载,“景到,在午有端,与景长。说在端”,其原理图见图 1.2.1。书中还提到“目以火见”,说明有了光照,人眼才能看到物体。东汉的《潜夫论》也有类似的论述:“夫目之视,非能有光也,必因乎日月火炎而后光存焉”。



图 1.2.1 墨子对光的论述及小孔成像原理

世界上对光本质的认识大致可以分为三个阶段^[10-11]:一是微粒学说,该学说最早是以艾萨克·牛顿(Issac Newton)为代表提出的,认为光实际是微粒,该理论可以对一些光学现象进行初步解释,如光的直线传播、反射等,后经过理论修正,发展为光量子学说;二是波动理论,最先由克里斯蒂安·惠更斯(Christiaan Huyghens)提出,理论上符合詹姆斯·克拉克·麦克斯韦(James Clerk Maxwell)电磁学方程,后通过海因里希·鲁道夫·赫兹(Heinrich Rudolf Hertz)实验证明;三是波粒二象性,即以近代量子力学为基础的光量子理论^[12]。最先提出量子假设的是德国物理学家马克斯·普朗克(Max Planck)(图 1.2.2),他认为电磁波的辐射波长的非连续状态,即量子态,但对于单一波长的辐射则以连续状态进行。阿尔伯特·爱因斯坦(Albert Einstein)对普朗克假设进行了发展,他认为单一波长的辐射也是以不连续状态进行的,即量子态,定义为光子。光量子理论对光电效应进行了成功的解释,该实验既体现出光子的粒子性,即入射光子数量对应着出射电子数量;又体现出波动性,即光子的能量与光子频率息息相关,共同表征了光子的波粒二象性^[13]。光子的波粒二象性后又通过康普顿散射(Compton scattering)得到进一步证明。

1.2.4 光的波粒二象性

根据爱因斯坦的光量子学说,光子具有微粒性,表现为具有质量、动量、能量等,这些物理量又与波动性紧密相关,即振动频率 ν ^[14]。根据狭义相对论质量和能量的关系 $\epsilon=mc^2$ 以及 $\epsilon=h\nu$,可以得到单个光子的质量

$$m = \frac{\epsilon}{c^2} = \frac{h\nu}{c^2} \quad (1.2.1)$$



图 1.2.2 1929 年, 爱因斯坦接受普朗克颁发的奖章

光子以光速传输, 根据狭义相对论物体质量和速度的关系为

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (1.2.2)$$

其中, m_0 为静止质量, 光子以光速传输, 所以光子的静止质量为 0。根据物体的能量和动量的关系

$$\epsilon^2 = p^2 c^2 + m_0^2 c^4 \quad (1.2.3)$$

光子静止质量为 0, 则光子的动量为

$$p = \frac{\epsilon}{c} = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda} \quad (1.2.4)$$

根据光子动能的定义也可以得到光子的动能, 有

$$p = mc = \frac{h\nu}{c^2} c = \frac{h\nu}{c} \quad (1.2.5)$$

1.3 激光技术的发展

“激光”的原意是“LASER”, 是 Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation 的缩写, 在我国曾被译为“镭射”“光受激辐射放大器”等^[15-16]。“激光”是我国著名科学家钱学森根据“受激辐射放大”的科学内涵而取名, 可谓简练而传神, 很快得到业内的普遍认可并广泛应用^[17]。下面简要概述激光技术的国内外发展史, 为科学研究提供有益借鉴。

1.3.1 激光技术国外发展史

1. 激光发明的理论准备：爱因斯坦的受激辐射假设

1916年,38岁的爱因斯坦根据物质吸收能量和辐射的守恒原理以及电子跃迁速率方程,预言了受激辐射的存在,但是发生概率只有万分之几,在实验中很难被观测到^[18]。第二次世界大战期间,军事雷达技术向短波段扩展的需求,使人们开始进行微波放大的研究。1952年,美国马里兰大学的威廉·爱德华·韦伯(Wilhelm Eduard Weber)开始运用受激辐射放大电磁波,但没有获得成果,后哥伦比亚大学的查尔斯·汤斯(Charles Townes)向韦伯索要论文,获得了崭新的进展。1954年,汤斯与学生戈登·古尔德(Gordon Gou)成功隔离了激发态氨分子,并实现了粒子数反转,再将受激氨分子束注入谐振器,分子受激跃迁产生 1.4×10^{10} Hz的辐射信号,这种微波段放大的装置称为MASER(microwave amplification by stimulated emission of radiation),译作脉赛^[19]。同年,苏联科学家巴索夫(Nikolai G. Basov)和普洛赫洛夫(Aleksandr M. Prokhorov)在莫斯科莱比德夫研究所也成功研制出脉赛(图1.3.1)。



图1.3.1 巴索夫(右)和普洛赫洛夫(左)带领汤斯(中)参观他们的实验室

2. 由脉赛到激光,激光通信的假设与实现

脉赛的研制成功,激励着人们向可见光波段扩展而努力。1957年,贝尔实验室的肖洛和汤斯提出了激光的思想,并申请了专利,该思想以“Infrared and Optical Masers”为题发表于*Physics Review*^[20]。同年,巴索夫和普洛赫洛夫也发表了实现激光的方法和构想。新的事物不可避免地受到质疑,肖洛和汤斯在申请专利时,贝尔实验室对激光不屑一顾,称光波从来没有对通信有过重大影响,该项发明对贝尔公司几乎没有意义。激光器概念和基本结构的提出,对激光的实现起到了关键性作用,做出了划时代贡献^[21]。1964年,汤斯和巴索夫与普洛赫洛夫分享了诺贝尔物理学奖。

3. 古尔德对激光发展的贡献

实际上古尔德从事激光器的研究非常早,1957年时他还是哥伦比亚大学辐射实验室的研究生,他当时的导师正是汤斯,他们于当年的10月谈论过关于铯的光激励问题。同年11月7—8日,他的脑海里出现了激光的基本概念,随后整理成论文,且在11月13日的笔记本上首次使用了“LASER”这个单词。除此之外,古尔德还预测了激光的热效应以及其他应用的可能性,如测距、激光聚变等。美国军方给予他100万美元的资助进行相关研究。但是,由于汤斯和肖洛率先发表了相关论文以及申请了相关专利,所以关于“激光之父”的地位,仍存在争议。古尔德及其标注的LASER见图1.3.2。



图 1.3.2 古尔德(左)与 Ben Seritsky 在一起做激光微波实验及其笔记本上标注的 LASER

4. 理论和技术从积累到突破:世界上第一台激光器的诞生

激光的原理和基本结构提出后,引起了物理学界的关注,大家都为实现第一台激光器而努力。汤斯和肖洛分别以钾/铯和红宝石作为激光工作物质,但是都没成功,从而认为红宝石不可能产生激光。而在1960年5月16日,美国休斯实验室量子电子学部的负责人梅曼(Theodore Maiman)用红宝石作为工作物质,采用端面镀膜的方式,将其插入螺旋状的氮气灯中,由此研制出世界上第一台激光器^[22]。梅曼将该成果整理成论文投到著名期刊 *Physical Review Letters*,被拒稿,原因是主编还搞不清楚脉赛与激光器的区别,1960年该论文在 *The New York Times* 和 *Nature* 上发表,其详细论述则于1961年在 *Physical Review* 上刊出。可见,前期科学家们的理论和技术研究,为激光器的诞生提供了大量的方案支撑,并最终由梅曼实现。梅曼研制的激光器及发表的文章见图1.3.3。

图 1.3.3 梅曼及其发表第一台激光器的 *Nature* 论文

5. 知识的交叉融合：氦氖激光器的诞生

红宝石激光器成功发明的同一年，相继出现了第二台、第三台激光器：掺钕氟化钙和掺钐氟化钙激光器。但真正得到广泛应用的则是伊朗籍物理学家贾范(Javan)制作的氦氖激光器。贾范曾是汤斯的学生，在哥伦比亚大学毕业后留学任教，他擅长光谱学，认为用混合的氦气和氖气可以作为光放大介质，产生激光。他在与肖洛的接触中得知采用两个平行的发射镜可以使光往返传播，反复进行放大。最终经过八个月的努力，贾范于1960年12月12日研制成功世界上第一台气体激光器，这也是光谱学与激光器结构完美结合的结果。

6. 激光技术的飞速发展

激光器研制成功后，相关研究成果如雨后春笋一般出现，例如：1964年美国卡斯珀(Kasper)制成了第一台化学激光器；1966年兰卡德(Lankard)等首先制成了有机染料激光器；……新型激光器的研发助推了大学、企业、政府机构以及军工单位的产学研融合发展，也对激光提出了新的需求，并推动了激光器的飞速发展，比较典型的如用于海底通信及探测的蓝绿光波段氪离子激光器。截至2022年，全世界已研发了数千种不同类型的激光器，包括高压气体激光器、气动激光器、准分子激光器、高功率化学激光器、自由电子激光器和X射线激光器等。当今社会的高速通信，完全离不开激光通信。异质结半导体激光器的研发为光通信提供了效率高、寿命长且稳定的光源，而光纤的发明提供了长距离传输的途径。前者的研发者若尔斯·阿尔费罗夫(Zhores Alferov)与赫伯特·克勒默(Herbert Kroemer)于2000年获得诺贝尔物理学奖；后者的发明人高锟(Charles Kuen Kao)因在“有关光在纤维中

的传输以用于光学通信方面”做出突破性贡献,于 2009 年获得诺贝尔物理学奖。高锟研究光纤,见图 1.3.4。



图 1.3.4 高锟在研究光纤

1.3.2 激光技术在国内的发展

我国光学技术研究起步较早,王大珩先生于 1957 年创办我国第一所光学专业的研究所——中国科学院长春光学精密机械与物理研究所(简称长光所)。

1958 年,肖洛和汤斯关于激光原理的文章发表不久,王大珩先生便积极倡导开展激光技术研究,并召集了大批具有创新精神的中青年科研骨干。1961 年,在王之江先生主持下,研制出我国第一台红宝石激光器。1963 年更是一个丰收年,邓锡铭先生等研制成我国第一台氦氛激光器,干福熹等研制成我国第一台掺钕玻璃激光器,王守武等研制成我国第一台 GaAs 同质结半导体激光器。1964 年,脉冲氩离子激光器研制成功。1965 年,CO₂ 分子激光器研制成功。1966 年,CH₃I 化学激光器和 YAG 激光器研制成功。在激光核能应用的理论方面,我国也走在了世界的前列,王淦昌先生与苏联科学家巴索夫分别于 1964 年和 1963 年,独立提出了用激光照射聚变燃料靶实现受控热核聚变反应的构想。

在激光发展初期,我国无论科研数量还是质量都基本接近世界先进水平,这在中国近代科技发展史上是比较罕见的。激光科技事业的发展也得益于国家层面的支持,当时中国科学院副院长张劲夫就提出设置专业激光研究所,聂荣臻副总理建议设立在上海。1964 年,中国科学院上海光学精密机械与物理研究所(简称上光所)成立,同年 12 月在上海召开全国激光会议,张劲夫、严济慈出席并主持会议。改革开放以后,激光技术的发展再次得到飞速发展,“神光”系列惯性约束聚变激光驱动器、“星光”系统超短超强激光器、“西部光源”的自由电子激光器等大科学装置

的建造为提升我国科技水平提供了强有力的工具。如今,激光产业覆盖了激光检测、激光通信、激光加工、激光医疗、激光印刷及激光全息等,这些产业正在成为新的经济增长点推动着我国的发展和进步。

1.4 激光的基本特性

激光独有的特性,使其在与材料作用过程中可以在特定的时间内将特定的能量,定向辐照到对象的特定位置上产生作用。激光作用效应和效果除了与激光参量有关,还与激光作用环境条件、加工材料特性等息息相关。可见,激光作用效应所涉及的学科很广,包括量子力学、材料学、热力学等学科。但激光的宏伟应用前景,吸引科学家们不断对激光效应进行深入研究,为激光器的发展和应用提供理论和技术支撑。

1.4.1 激光的基本特性及应用

激光的产生源于激光工作物质中电子的受激辐射,而受激辐射与激励光子具有“四同”特性,即同波长、同方向、同偏振和同位相,这使激光的基本特性不同于普通的光源,具有单色性、单方向性、相干性、高亮度等独特性质,并具有独特的应用前景^[23]。单色性是由于受激励发射光子与激励光子能量相同,使激光光束光子波长相同,线宽很窄,可应用于测量、标准光源等^[24];相干性是指所有光子具有相同波长、相同位相以及相同偏振等,主要应用于全息照相、全息存储等;单方向性是由于受激辐射光与激励光子具有相同的传输方向,激光束实际上由大量平行移动的光子组成,向同一方向运动且发射角很小^[25];发散角小,光束定向传播会使绝大部分能量集中在传输途径上,使得激光具有高亮度的特性;方向性好可以使激光能量定向传输,同时到达靶材料,该特点在激光加工、激光手术、激光武器等领域得到广泛应用^[26-27]。

1.4.2 激光束参量描述

除自由电子激光器,所有类型激光器的工作原理和结构基本相同,主要包括激光工作物质、泵浦源及谐振腔等三个基本部件。具有亚稳能级的激光工作介质使受激辐射较受激吸收和自发辐射等占主导地位,从而实现光放大^[28]。泵浦源(激励源)给激光工作介质提供激励,使其吸收外来能量后受激跃迁到激发态,为实现和维持粒子数反转状态创造条件,激励方式包括光学激励、气体放电激励、化学激励和核能激励等。谐振腔使腔内光子有一致的频率、相位和运行方向,输出激光具有良好的定向性和相干性。描述激光的参量很多,包括激光模式、激光波长、脉宽、

重复频率、光束质量、脉冲能量/能量密度、功率/功率密度等,这些参量对激光作用效应起到关键的主导作用^[29]。激光参量的差异取决于激光器的类型和运行条件,也决定了对材料烧蚀的结果,是激光推广应用的研究基础,下面对激光参量与烧蚀效应之间的关系进行归纳^[30]。

(1) **激光模式**是指激光器产生的辐射场对应的振荡图样,也就是在激光谐振器内能稳定存在的稳定电磁波分布场,即光场本征态。激光模式可以从时空两个方面进行划分:在激光传输方向形成的稳定振荡模式称为纵模,对应于激光的频率;在与传输方向垂直的方向得到的是光场的空间分布场,即激光的横模,也称为模电磁波模(transverse electromagnetic mode, TEM)。纵模的分布决定了激光辐射波长或频率,横模则决定了光场的分布。两种模式都会对激光作用的烧蚀效果产生重要影响^[31]。图 1.4.1 是四川大学冯国英教授测得的光纤输出模式。

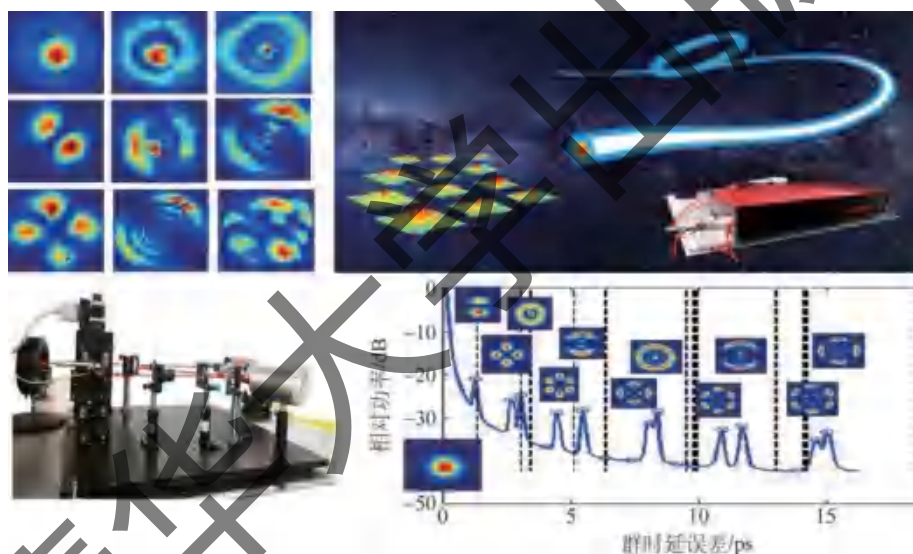


图 1.4.1 高功率光纤传输的模式(空间和光谱双重傅里叶变换法(F^2)测量装置及结果)^[31]

(2) **激光波长**取决于激光工作物质及谐振器结构,不同激光工作物质,对应的能级结构也会不同,由此产生不同波长的激光。不同波长的激光产生的作用效应也不同,如图 1.4.2 所示。

同时激光波长的不同决定了材料对激光的响应机理不同,进而影响烧蚀的效果;材料的差异取决于内部原子分布以及对应库仑场分布的不同,进而影响到材料对激光的响应规律差异。对电介质材料,将光子能量与材料带隙对比,若前者比后者高,则属于单光子吸收,材料直接吸收入射激光;反之,激光光子可以全部通过。但若激光光强很强,还可以发生多光子吸收,引起激光能量的沉积。对于半导

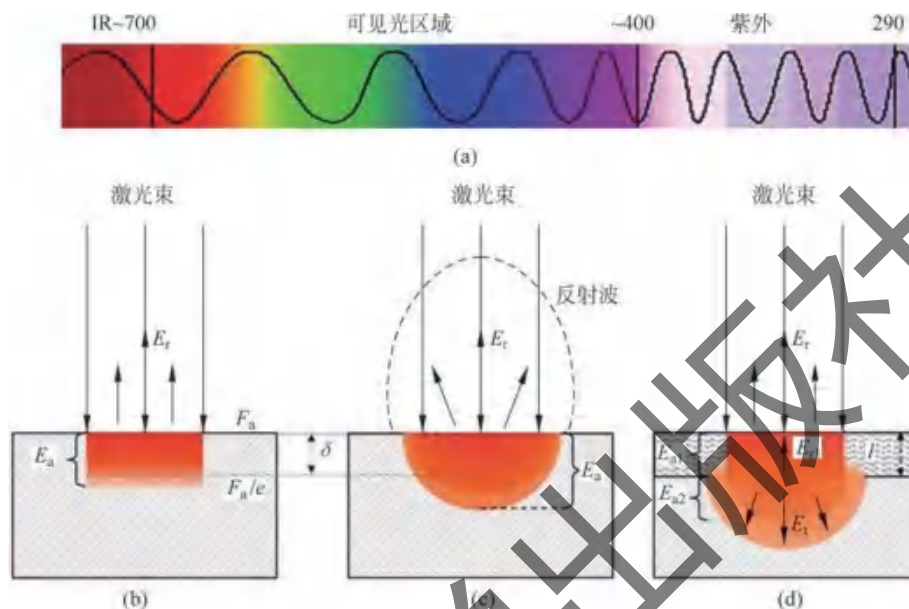


图 1.4.2 不同波长的烧蚀效应

体材料,内部由于热运动会产生部分自由电子,对激光进行直接吸收;另外,由于半导体带隙较窄,激光容易发生单光子吸收。对于中红外波段的激光,半导体才具有一定的透过率,这一特点可以运用到半导体隐形切割中;对于金属材料,材料内部存在大量自由电子,可以直接吸收激光,称为逆韧致吸收,这会引起激光能量的直接沉积;同时,金属内部自由电子的存在也会使其具有较高的反射率^[32]。

(3) **脉冲能量**是指激光脉冲输出的总能量,考虑到激光输出光束,可以采用能量密度描述能量在空间的分布情况,两者决定了激光烧蚀程度和范围。**激光功率**是指在单位时间内的激光脉冲能量。**功率密度也叫作光强**,是指单位面积的脉冲功率,表征了在单位面积上单位时间内的脉冲能量,这是引发非线性电离效应的关键参量^[33]。超短脉冲通过缩短激光脉冲的持续时间及辐照空间,可以获得极高的光强,是研究强场物理的唯一实验手段。

(4) **激光重复脉冲**是指激光在单位时间内输出的脉冲个数,脉冲重复频率影响材料内部的热积累和扩散、缺陷的增长与消退等。根据激光脉冲重复频率的不同,可以分为连续模式(CW 模)、准连续模式以及脉冲模式^[33]。连续模式是指激光工作介质在连续泵浦下保持激光的连续输出;准连续模式的脉冲频率很高,可以达几万赫兹,这两种运行模式都注重激光输出的平均功率。脉冲模式输出则将激光能量集中于单个脉冲,这样主要是为了增强单脉冲的能量和强度,注重单次脉冲的作用效果。激光脉冲的能量及作用次数都会影响作用效果,如图 1.4.3 所示。

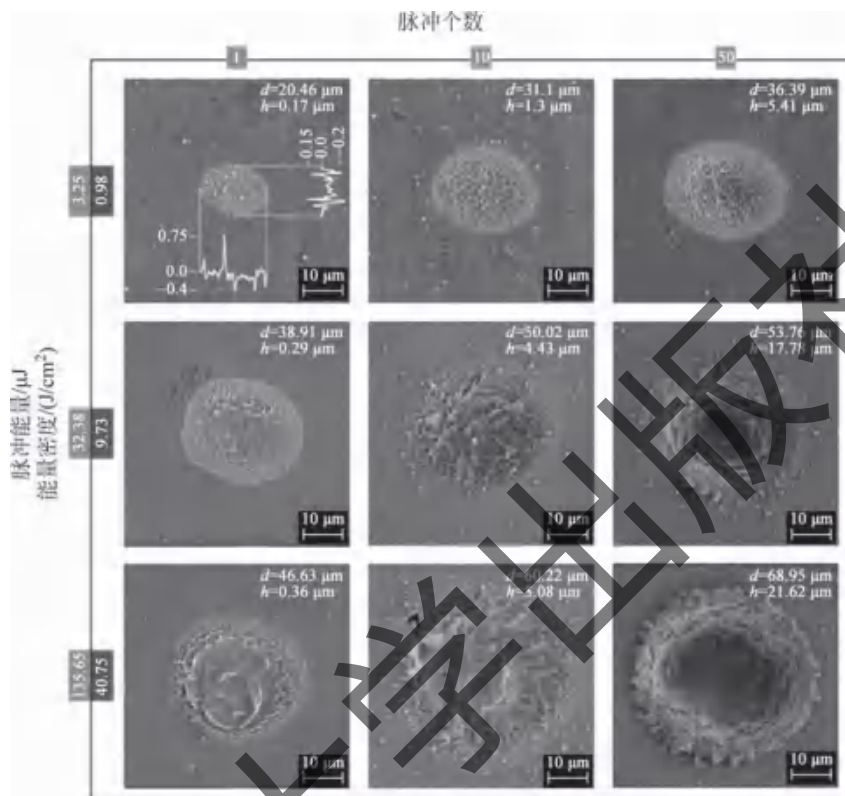


图 1.4.3 不同能量和脉冲作用次数下锌金属表面的烧蚀孔

(5) 光束质量是对输出光束的评价,表征激光辐照到样品的光束特性,用于描述激光的传输、聚焦、发射度、瑞利距离等参量特性^[34]。光束质量的定义较多,包括远场光斑半径、远场发散角、衍射极限倍数 U 、斯特列尔比、 M^2 因子、靶面上的功率或环围能量比等^[35]。 M^2 因子是常见的一种描述光束质量的方式,对于确定的激光光束,束腰宽度 w_0 与远场发散角 θ 的乘积(光束参数乘积,beam parameter product,BPP)经过光学系统后不会发生改变,可以作为光束质量评价方式。 M^2 因子(质量因子)还可以用于表征光束参数乘积与理想基模光的偏离程度,该值越趋近于1,说明实际光束越接近于理想光束。

1.5 典型激光器

激光的实际应用需求对激光器稳定性和激光束的参量等都提出了很高的要求,这也催生了各类激光器的研发,可以根据不同激光参量进行分类:按波长范