

GAOQIANGDU JIGUANG ZUOYONGXIA
CAILIAO GAIXING

高强度激光作用下 材料改性

■ 张秋慧 著



黄河水利出版社

高强度激光作用下材料改性

张秋慧 著

黄河水利出版社

· 郑州 ·

内 容 提 要

本书系统介绍了高强度激光作用下材料改性问题,它不仅涉及许多物理机制,而且涉及材料的特性问题,属于交叉学科。主要内容包括:总结和概括光与物质相互作用机制,以及纳米微结构光储能的相关工作;分析纳秒激光对 K9 玻璃的表面损伤问题;研究 KTP 晶体在高强度激光作用下的灰迹问题对二次谐波转换效率的影响以及产生的相位调制问题;实验研究纳米微结构水分解问题和新型光电材料石墨烯在激光作用下的改性问题;分析高强度激光作用下薄膜损伤特性;总结概述飞秒激光脉冲在透明介质中的成丝问题等。

本书可供高功率激光系统、光与物质相互作用等领域研究人员阅读,也可以作为纳米微结构材料光储能研究领域人员参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

高强度激光作用下材料改性/张秋慧著, —郑州:
黄河水利出版社, 2016. 9
ISBN 978 - 7 - 5509 - 1506 - 0

I. ①高… II. ①张… III. ①高强度 - 激光 -
应用 - 材料科学 - 研究 IV. ①TB3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016) 第 175622 号

组稿编辑:陶金志 电话:0371 - 66025273 E-mail:838739632@qq.com

出 版 社:黄河水利出版社

地址:河南省郑州市顺河路黄委会综合楼 14 层

邮政编码:450003

发行单位:黄河水利出版社

发行部电话:0371 - 66026940、66020550、66028024、66022620(传真)

E-mail:hhslebs@126.com

承印单位:河南省瑞光印务股份有限公司

开本:787 mm × 1 092 mm 1/16

印张:10.25

字数:200 千字

印数:1—1 000

版次:2016 年 9 月第 1 版

印次:2016 年 9 月第 1 次印刷

定价:28.00 元

前 言

能源和环境是人类赖以生存的基本条件,随着常规能源的日益枯竭以及环境污染给生存环境带来的压力,传统能源的供给能力将很快不能满足全球能源消费的需求,同时传统能源带来的环境问题亟待解决,所以对绿色可持续新能源的开发成了科学家的当务之急。在众多解决方案中,聚变能源以及纳米微结构光储能起着越来越不可替代的作用。这两个方案均涉及高强度激光作用下材料的改性问题,而且在不同的领域所起的作用不同。

对于惯性约束核聚变(ICF)来说,高强度激光作用下材料改性问题所起的作用为消极作用,这主要是由于ICF中的高功率激光驱动器需要在高功率、高负载条件下运行,涉及规模庞大、结构复杂的大型激光系统,其构成部分包括空间滤波、多程放大系统等大型的光学系统,几乎每个环节都涉及光学元件的损伤问题;同时,高能激光脉冲极易造成光电探测器损伤,因此可以说光学材料在高强度激光作用下的改性问题已经成为制约高功率激光系统输出的瓶颈问题之一。对于纳米微结构光储能来说,高强度激光作用下材料的改性问题起到了积极的作用。由于纳米材料尺寸小,且光生载流子出现在材料的表面,这为光催化提供了便利条件。最近几年,纳米材料在光化学电池和光催化领域发挥着越来越重要的作用。高强度激光作用下的纳米微结构改变了材料的物理特性和电化学特性等,特别是在纳米尺度内改变了材料的一些特性,这对材料同周围环境相互作用是至关重要的。合理地开发利用纳米科学和纳米技术,将给我们的工业生产和生活带来革命性的飞跃。

高强度激光作用下的材料改性问题不仅涉及许多物理机制,而且涉及材料的特性问题,属于交叉学科。高强度激光作用下材料改性的物理过程涉及激光能量沉积、电子跃迁、电离、断键、色心形成、逆韧致吸收等众多方面;就激光参量来看,涉及连续、纳秒、皮秒、飞秒等激光作用下的材料改性问题,以及材料改性同激光参量之间的关系;就材料特性来看,既涉及包括绝缘体、金属、半导体在内的无机物,又涉及有机物问题,以及光学元件在加工过程、使用环境等中的每一个环节。由于其研究的重要性和复杂性,相关研究从激光诞生起就已经开始,不仅取得了很多有价值的研究成果,而且建立了相关模型,为人们对这个问题的不断深化提供了良好的理论和实验基础。本书在总结和借鉴这些有价值的理论和模型的基础上,针对惯性约束核聚变工程以及纳米微结构储能的需求,就纳秒激

光对 K9 玻璃的表面损伤问题、磷酸氧钛钾 (KTP) 晶体在高强度激光作用下的灰迹问题对二次谐波转换效率的影响以及产生的相位调制问题、纳米微结构水分解问题、新型光电材料石墨烯在激光作用下的改性问题等,通过实验和理论分析相结合的方式进行了系统和深入的研究。其主要内容包括以下几个方面:

(1) 在认识到研究高强度激光作用下材料改性问题的重要性和复杂性的同时,介绍了激光参数对高强度激光作用下材料改性问题的影响,以及此问题的国内外研究现状、相关理论模型等;概括总结了光与物质相互作用原理,以及纳米微结构光储能的相关工作。

(2) 在考虑激光与物质相互作用产生等离子体,从而引起物质破坏的同时,主要分析了波长为 1 064 nm 的纳秒激光脉冲与 K9 玻璃相互作用产生的环状破坏,发现只有在重复脉冲作用下才能产生环状破坏,并给出了破坏点的立体形貌照片,从中发现了损伤立体形貌的特点;同时从实验上得到透射样本的能量与脉冲个数的关系曲线,并且基于 LSDW(激光支持的爆轰波)理论对上述结果进行了定性分析。

(3) 根据有效介电函数表达式推导了 KTP 晶体吸收系数的表达式,并根据导带电子密度的演化规律推导了 KTP 晶体吸收系数和倍频转换效率的演化表达式,模拟了其演化规律,为提高高功率激光系统的倍频转换效率提供了理论参考。

(4) 通过光吸收实验和数值模拟研究了 KTP 晶体灰迹现象和灾难性破坏,使用色心模型和断键模型解释了 KTP 晶体中灰迹的演化规律,并给出了减少和抑制灰迹的方法,有利于提高高功率激光系统的输出功率以及光束质量。

(5) 研究了飞秒激光在 KTP 晶体中引起的相位调制。通过控制飞秒激光脉冲的参数,得到了不同的调制结果。利用 Drude 模型和色心模型推导和模拟了激光辐照区的相位变化。同时利用环路径向剪切干涉仪测量了相位变化的空间分布和演化。此方法可以用于低成本光开关、激光光束整形和电光传感器等。

(6) 归纳总结了常用的纳米微结构制备方法,在归纳总结的基础上分析了各制备方法的利弊;同时,介绍了一种新型光催化剂 CoO 纳米晶,由飞秒激光辐照 CoO 颗粒制得,此催化剂不需要放在特定的催化体系中即可实现可见光辐照下水分解,不仅可以用作低成本、高效率水分解催化剂,而且对表面纳米结构光催化做出了新的理解;测量了 CoO 纳米晶的漫反射谱、光学带隙和拉曼等光学特性;最后,利用气相色谱仪和扫描电子显微镜 (SEM),分析了 Fe 纳米晶材料可见光光催化储氢,从理论上分析了 Fe 纳米晶材料可见光光催化储氢的机制。

(7) 采用化学汽化沉积法制备了单层和多层石墨烯样品,并转在不同的基底上,测量了石墨烯材料透过率同层数的关系,同时给出了高强度激光辐照下单

层石墨烯和多层石墨烯拉曼光谱的变化和损伤形貌,激光辐照的热作用使石墨烯 G 带和 2D 带均向高频移动。

(8) 采用磁控溅射法在 K9 玻璃上镀制 SiO_2 薄膜的同时,采用离子辅助镀膜法在 K9 玻璃上镀制 HfO_2 膜,利用热破坏效应、激光等离子体的破坏效应以及散射和干涉破坏效应的影响,分析了颗粒尺寸对激光的沉积、扩散以及引发薄膜应力断裂的物理过程,为实际镀膜工艺制造中的杂质微粒控制提供了指导。

(9) 飞秒激光脉冲在空气或其他介质中传播时,由于自聚焦效应和电离产生的等离子体带来的散焦效应共同作用而达到一种动态平衡,使得飞秒激光脉冲在长距离范围内稳定地传播,形成成丝现象。在现有国内外研究基础上,总结分析了超短脉冲非线性传播特性、成丝特点、成丝现象产生的物理机制及飞秒成丝应用。

作 者

2016 年 5 月

目 录

前 言

第 1 章 绪 论	(1)
1.1 当前高强度激光作用下材料改性研究热点	(5)
1.2 高强度激光作用下材料改性	(6)
1.3 纳米结构材料光催化	(11)
1.4 本书主要内容	(13)
第 2 章 高强度激光辐照材料改性的机制分析	(15)
2.1 光与物质相互作用	(15)
2.2 激光辐照下透明介质的变化	(22)
2.3 多脉冲作用下的疲劳破坏机制	(23)
2.4 激光主要参量对损伤机制的影响	(28)
第 3 章 多脉冲激光对 K9 光学元件表面损伤的实验研究	(30)
3.1 多脉冲作用的实验研究	(30)
3.2 实验结果的理论分析	(34)
3.3 结 论	(38)
第 4 章 以一定重复频率工作的 KTP 倍频效率的演化规律	(39)
4.1 KTP 晶体	(41)
4.2 倍频理论	(43)
4.3 理论模型	(44)
4.4 计算结果和讨论	(48)
4.5 结 论	(52)
第 5 章 KTP 晶体在高重复频率脉冲下的损伤研究——灰迹和灾难性破坏	(54)
5.1 实验装置	(57)
5.2 实验结果和讨论	(58)
5.3 结 论	(67)
第 6 章 飞秒激光在 KTP 晶体中的相位调制	(68)
6.1 实验装置	(68)

6.2	理论分析	(69)
6.3	实验结果和讨论	(73)
6.4	结 论	(77)
第7章	飞秒激光脉冲作用纳米微结构光催化	(78)
7.1	表面纳米微结构的制备方法	(78)
7.2	飞秒激光制备 CoO 纳米晶水分解催化体系光学性质	(80)
7.3	飞秒激光辐照 Fe 纳米晶光催化水分解	(85)
7.4	结 论	(89)
第8章	石墨烯在激光作用下改性的拉曼研究	(90)
8.1	样品制备	(90)
8.2	石墨烯在激光辐照下的损伤	(92)
8.3	理论分析	(96)
8.4	结 论	(97)
第9章	高强度激光作用下薄膜损伤特性研究	(98)
9.1	杂质微粒对薄膜的损伤效应	(99)
9.2	金属杂质粒子诱导薄膜的损伤机制研究	(108)
第10章	飞秒激光脉冲在透明介质中成丝	(116)
10.1	超短脉冲的非线性传播特性	(117)
10.2	光丝特性	(126)
10.3	成丝模型	(129)
10.4	飞秒成丝应用	(134)
第11章	总 结	(141)
参考文献		(143)

第1章 绪论

自20世纪60年代第一台激光器诞生以来,人类对光的利用及相应学科的研究进入了一个崭新的阶段,激光以其与传统光源相比所独有的一系列显著优点而在各个领域迅速得到日益广泛的应用。激光具有高亮度、高方向性、高相干性和高稳定性的优点,故其在工业、军事、医疗、光通信、光信息存储和处理等领域应用广泛,同时取得了良好的经济效益和社会效益。

当一束光入射在光学介质上时,光学介质将吸收、透过、反射和散射入射光。激光具有极高的能量密度或功率密度,当与物质相互作用时产生明显的光效应或热效应,光效应或热效应将引起材料的改性和损伤等,在激光医疗、激光加工、激光武器、惯性约束核聚变等方面的实际应用既有利又有弊,我们应该区别对待,变弊为利。

在激光的众多应用领域中惯性约束核聚变由于能够获得安全、无污染的能源,备受人们重视。能源,作为人类发展的基本要素之一,其开发和利用一直受到人们的广泛关注。随着全球经济、社会的高速发展,人类对能源的需求也与日俱增。目前,占据能源供应主要地位的煤、石油、天然气等自然资源均属于不可再生资源,其存储量正逐日减少。据报道,21世纪中叶前,地球上的煤、石油、天然气等自然资源将会枯竭,人类即将面临能源短缺的严重危机。基于核裂变反应的核裂变能也由于安全性和核废料的处理等问题而不尽人意,人类期待着新的能源。当前,通过受控核聚变产生聚变能是获取新能源的主要途径之一,核聚变能较核裂变能安全、无污染,且原料来源丰富,因此核聚变受到人们越来越多的重视,各国也投入大量的人力、物力对核聚变能加以研究。

20世纪40年代,人们提出了磁约束核聚变(MCF)的思想,磁约束核聚变主要依靠强有力的磁场将低密、高温的等离子体约束足够长时间以使氘、氚等离子体达到核聚变反应所需的条件。经过科学家的不懈努力,目前,磁约束实验装置已经分别可以将较低温度、较低密度的等离子体约束足够长的时间或者在短时间内将等离子体加热。

激光问世后不久,基于高强度激光技术高精度、高能量的特点,人们提出采用高功率激光加热燃料以达到热核反应温度。我国科学家王淦昌和苏联科学家巴索夫于1964年同时独立地提出了利用高强度激光实现惯性约束核聚变(ICF)的想法。美国劳伦斯利弗莫尔国家实验室(LLNL)于1972年提出了利用

内爆原理将热核燃料压缩至高温高密度来实现聚变的概念,这都是惯性约束核聚变研究具有里程碑意义的进展。

惯性约束核聚变(ICF)是利用高功率激光束(或粒子束)均匀辐照氘、氚等热核燃料组成的微型靶丸,在极短的时间里靶丸表面在高功率激光的辐照下会发生电离和消融而形成包围靶芯的高温等离子体。在高温、高压下,氘、氚燃料在还没来得及飞散之前的短暂时间内引发聚变核反应。惯性约束核聚变反应过程如图 1-1 所示,由以下 4 个阶段组成:①激光束均匀辐照靶丸迅速地将靶丸表面物质离化形成等离子体;②等离子体膨胀所产生的反冲对靶丸进行压缩;③在压缩的后期,靶丸的核心部分达到 1 亿℃的高温 and 相当于 20 倍固体铅密度的高密度,从而在被压缩的燃料中心产生“热斑”;④整个靶丸实现热核反应并释放能量。

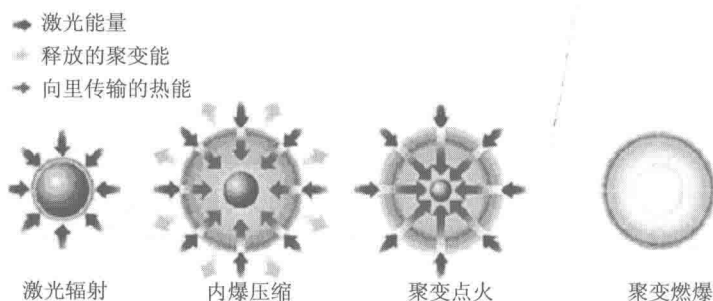


图 1-1 惯性约束聚变的 4 个阶段

ICF 高功率固体激光驱动器的主要构成如图 1-2 所示。1988 年 10 月,美国能源部批准了国家点火装置(NIF)计划,目前正在建造之中。美国 LLNL 实验室建造的 NIF 是当前世界上最为先进的激光核聚变装置,其技术指标最苛刻、工程加工要求最高,且造价高昂。美国 LLNL 实验室已按 NIF 设计参数完成了全尺寸的单路原型样机 Beamlet 的建造,并在上面完成了大部分关键单元技术的实验研究。NIF 共有 192 路激光束,总输出功率将高达 5×10^{11} kW,这个功率大约相当于美国全国发电量的 1 000 倍。2002 年 12 月,已完成 192 路中的 4 路,获得了里程碑意义的成果,为将来的发展铺平了道路,NIF 装置示意图如图 1-3 所示。

除美国外,世界上很多国家也相继展开相关研究:1993 年,法国原子能委员会批准了 LMJ 计划。英国开展了建造 100 TW 激光系统的研究工作。俄罗斯在经历了数十年发展碘激光技术之后,也转向发展固体激光技术的研究。日本制定了激光-12(GKEKKO-Ⅻ)激光装置的升级和金刚激光装置的建造计划。

我国 1993 年建成了星光-I 激光装置,并在 1995 年升级为星光-II 装置(300 J),1985 年建成神光-I 装置,2000 年升级为神光-II(6 kJ)。我国已将

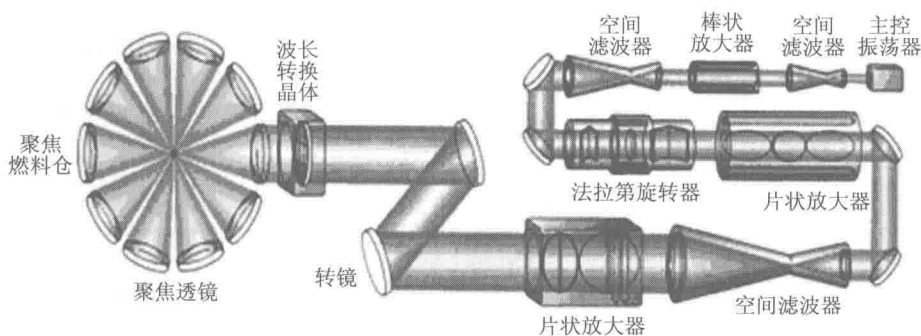


图 1-2 ICF 高功率固体激光驱动器的主要构成

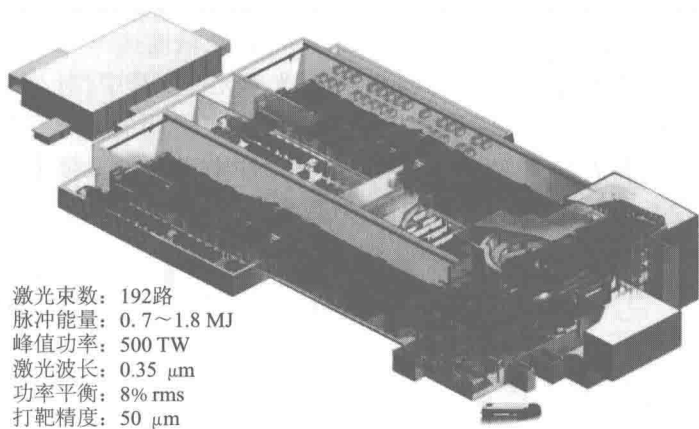


图 1-3 NIF 装置示意图

ICF 研究列入“863”计划,并于 1993 年成立了国家高技术惯性约束核聚变委员会。世界上主要的 ICF 高功率固体激光系统如表 1-1 所示。

表 1-1 世界上主要的 ICF 高功率固体激光系统

国家	实验室	装置名	束数(路)	能量(kJ)	波长(μm)
美国	LLNL	Nova	10	125/80/55	1.06/0.53/0.35
		NIF(在建)	192	1 800	0.35
	激光能学实验室	Omega	24	3/2	1.06/0.35
	海军实验室	Pharos	2	1.3	1.06/0.35
	KMS 公司	Chroma	2	1	1.06/0.35
俄罗斯	列别捷夫所	Delfin	108	10	1.06
日本	激光工程所	Gekko - XII	12	20/15/2	1.06/0.53/0.35

续表 1-1

国家	实验室	装置名	束数(路)	能量(kJ)	波长(μm)
法国	利梅伊-瓦伦顿中心	Phebus	2	20/10	0.53/0.35
		LMJ(在建)	240	2 000	0.35
英国	卢瑟福-阿普尔顿	Lulli	6/12	1	0.53
意大利	弗拉斯卡蒂	ABC	1	0.1	1.06/0.53
中国	上海光机所	神光-Ⅲ	8	6/2	1.06/0.35

NIF 工程是相当庞大的激光工程,其光路如图 1-4 所示,主光路分为六个部分:主激光系统、光束控制系统、激光注入系统、光脉冲发生系统、光开关区域以及终端光束会聚系统,工作激光波长为 355 nm,打靶精度达 50 μm 。由此可见,这个庞大的激光系统需要数量巨大的高质量光学元件。其中,对 42 cm $\times$ 42 cm 以上尺寸的大口径光学元件需要约 7 500 件,加上备份用的光学元件以及小口径光学元件总计共需约 30 000 件,这给光学元件生产和加工带来了巨大的挑战。其大口径光学元件的类型、材料尺寸、数量统计如表 1-2 所示。

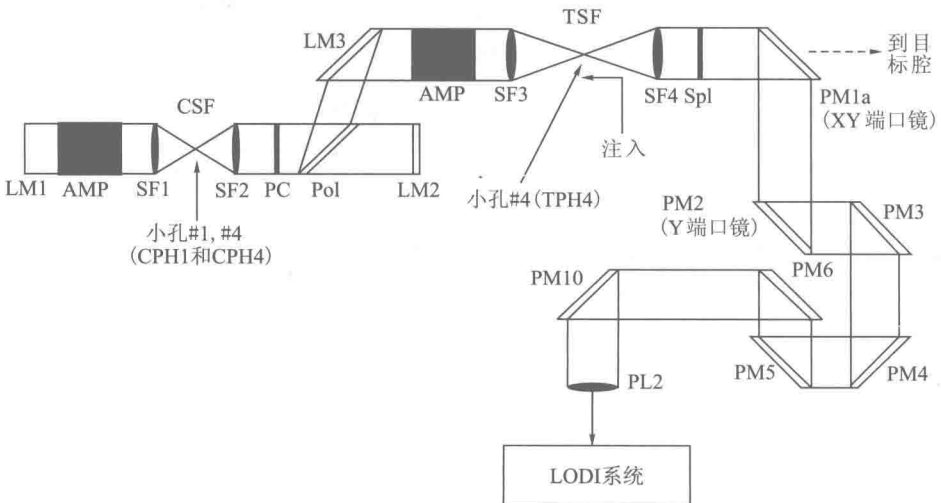


图 1-4 NIF 的光路

相对一般的激光器而言,作为 ICF 高功率固体激光驱动器的激光器的能量非常高,一般都在千焦量级以上。整个激光系统中包含有很多不同类型镀膜或不镀膜的光学元件,如各种透镜、晶体等,这些元件对激光的抗损伤能力决定着系统的运行性能和功率发展水平,因此高强度激光诱导元件的损伤问题成为激光惯性约束聚变中的一项重要课题。与此同时,随着高功率固体激光系统的发

表 1-2 NIF 大口径光学元件统计

类型	材料	尺寸 (mm × mm × mm)	数量
放大片 (Amplifier slabs)	钕玻璃 (Nd Laser Glass)	800 × 456 × 41	3 072
透镜 (Lenses)	熔石英 (Fused Silica, FS)	434 × 434 × 46	962
可变形镜 (Deformable mirrors)	BK - 7	450 × 434 × 10/30	792
腔镜 (Cavity mirrors)	BK - 7	412 × 412 × 80	792
肘形镜 (Elbow mirrors)	BK - 7	417 × 740 × 80	792
传输镜 (Transport mirrors)	BK - 7	(440 ~ 690) × 80	816
偏振片 (Polarizers)	BK - 7	417 × 807 × 90	792
晶体 (Crystals)	KDP/KD * P	410 × 410 × 10/9	576
防溅射片 (Debris shields)	熔石英 (FS)	440 × 420 × 10	192
开关窗口透镜 (Switch Window)	熔石英 (FS)	430 × 430 × 30	384
真空窗口 (Vacuum windows)	熔石英 (FS)	440 × 440 × 43	192
衍射光学元件 (Diffractive optics plate)	熔石英 (FS)	440 × 420 × 10	192
总计			9 554

展,光学元件的损伤问题已经越来越突出。各种光学元件,如透镜、光栅、放大器、晶体、膜层、激光探测器等都容易因为受到高强度激光的作用而导致损伤破坏,而且在各种光学材料中,如常见的 K9 玻璃、BK7 玻璃、半导体材料、衰减片等,也会出现形式不同的破坏。因此,光学元件的抗激光损伤能力成了限制高功率固体激光输出的一个重要因素,是迫切需要解决的问题,各国都投入了大量的精力进行相关的研究。

1.1 当前高强度激光作用下材料改性研究热点

在高功率固体激光系统中,激光诱导光学元件损伤问题成为制约激光系统

朝更高功率发展的一个关键问题。20 世纪 70 年代初,随着高功率固体激光器的出现,科研人员意识到光学元件的抗激光损伤能力已成为限制激光器发展的因素之一,目前关于此问题的研究主要集中在以下两点。

1.1.1 负载能力

决定负载能力大小的因素很多,从光学元件本身来讲主要有光学材料、加工过程等。光学材料要求材料内部杂质少、均匀性好等,而加工过程涉及材料切割、抛光、清洗和镀膜等,对各个工艺过程严格控制才能加工出高损伤阈值的光学元件。其中,整个元件最薄弱的环节是膜层,膜层的阈值取决于镀膜材料的选择和工艺控制,工艺控制方面主要是控制镀膜过程中出现的各种缺陷,如杂质、结瘤、气孔等。

1.1.2 使用寿命

光学元件的使用寿命主要涉及重复脉冲的作用问题。对于单脉冲破坏和重复脉冲破坏的机制,国内外的研究已经开展了很多,大致可以分为两类:一类是研究单脉冲与重复脉冲的区别,单脉冲破坏是基于介质的非线性电离作用、热应力作用等,但重复脉冲破坏主要是基于介质内部缺陷的累积效应。重复脉冲作用下介质累积的缺陷分为色心累积、断键累积、微裂纹等,并最终导致物质的灾难性破坏。另一类是研究两者之间的联系,主要是通过实验得到,大量实验结果表明两者呈指数关系。对在不同数量的激光脉冲作用下,介质在破坏前所经历的激光脉冲辐照过程的物理变化进行分析,并结合介质损伤机制进行对比,对理解这两类之间的关系是非常重要的。

1.2 高强度激光作用下材料改性

1.2.1 高强度激光作用下材料改性研究的复杂性

高强度激光作用下材料改性的研究涉及多种学科领域,当激光束作用在材料上时,电磁能首先转化为电子激发能,然后转化为热能、化学能和机械能,在整个过程中,分子结构以及材料的形状都以多种形式发生变化^[1]。同时,高强度激光作用下纳米材料加工将改变材料的光学和电化学性质,极大地改善了材料的某一种或多种功能。光与物质相互作用分为线性和非线性两种光学效应。当光强足够小时,光在物质中传播时表现为线性光学现象,材料的性质不随光强变

化而变化;当光强足够大时,光在物质中传播时表现为非线性光学现象,材料的性质将随光强的变化而变化。分析问题时,不仅要考虑激光参数(如激光波长、脉宽等)的影响,还要充分考虑材料特性的影响。

波长表示光子能量,根据 Keldysh 理论^[2]可知:光与电介质作用时,短波长激光由于具有较高的光子能量,更容易引起多光子电离,从而引起介质的击穿^[3]。实验研究也发现,针对同种材料,材料对波长为 355 nm 的激光损伤阈值低于对波长为 1 064 nm 的激光损伤阈值^[4]。脉宽决定了入射激光脉冲与材料的作用时间,物质特性变化需要的时间不同决定了其对不同脉宽脉冲响应不同^[5-7]。电子吸收光子的时间大约为 fs 量级,电子与晶格碰撞平衡的时间段为几个皮秒,晶格融化大约是个纳秒,对于飞秒和皮秒激光脉冲,激光作用完毕,电子能量还来不及传递给晶格,故主要是电子作用,而对于纳秒激光脉冲主要是热作用。能量密度直接决定了激光能量在材料中的沉积,根据激光辐照能量密度的大小可以将其作用效果分为如下几个阶段^[1]:当辐照强度小于 10^6 W/cm^2 时,所产生的蒸气比较稀薄,基本上透明,但蒸气的折射率会引起激光束波前的变化;当辐照强度为 $10^7 \sim 10^{10} \text{ W/cm}^2$ 时,蒸气会产生部分电离,并吸收大部分的激光能量,当辐照强度大于蒸气的电离阈值时,会引起介质表面蒸气的击穿,从而对材料表面产生破坏,同时由于激光等离子体的掩蔽效应还会阻止激光能量的进一步传播;当辐照强度为 $10^9 \sim 10^{10} \text{ W/cm}^2$ 时,激光等离子体会变得透明,激光照射到固体表面,烧蚀压力产生一个冲击波,使得材料性质发生变化。

光诱导光学元件的损伤是一个十分复杂的过程,涉及的因素众多,要从理论上得到大于几百皮秒脉冲作用下元件的激光损伤阈值(LIDT)是极其困难的,通常情况下,该参量的值基本上都是通过实验获得的,结合实验,利用统计方法可计算出各种常用光学元件的激光损伤阈值。在损伤测试的过程中,难点就是对损伤的判断,目前已经发展了包括相衬显微镜观察、散射光等多种方法。此外,缺陷是引起损伤的一个得到大家共识的原因,人们摸索出了很多以光热技术为基础的探测表面缺陷或者是压表面缺陷的方法,随着研究的深入,研究者甚至将一种可以对材料和生物组织横截面进行高分辨率成像的新兴方法——光学相干 X 射线断层摄影术(Optical Coherence Tomography, OCT)用在了损伤检测领域,极大地丰富了损伤形态学研究的实验手段。同时,可根据损伤实验出现的现象,忽略某些次要因素、突出某些重要因素得到一系列的激光诱导损伤的机制。虽然这些结论具有片面性,但是将多种机制结合起来却能解决目前的大部分问题。

1.2.2 高强度激光作用下材料改性研究的现状

20 世纪 60 年代初,随着调 Q 激光器的出现,激光诱导光学薄膜的激光损伤就为人们察觉。70 年代初,随着高功率激光器的出现,科研人员意识到系统中元件本身的抗激光损伤能力已成为限制激光器发展的重要因素之一。

早在 1970 年,R. W. Hopper 等就对玻璃中包裹物的损伤机制做了详细探讨。随后 Bloembergen 对裂纹、吸收包裹物等对透明介质表面损伤阈值的影响做了分析。1978 年,W. Lee Smith 对光学材料的激光损伤进行了测量和分析,讨论了雪崩电离和多光子吸收的物理过程。1981 年,Thomas W. Walker 等总结了激光脉冲对光学薄膜的损伤机制。将光学薄膜的激光损伤机制归结为雪崩电离、多光子吸收、杂质诱导损伤等。由于薄膜中的缺陷引入了缺陷能级,使得电子更容易电离,因此杂质诱导损伤不可忽略,由于雪崩电离、多光子吸收、杂质模型都不能完全解释激光损伤的规律,而且不能得到计算激光损伤阈值的公式,1998 年 V. N. Strekalov 提出了原子吸收模型,得到损伤阈值的估计公式,但是仍然不能完美地解决问题。国内外专家发表了不少论文,研究了光学材料的体损伤和表面损伤以及薄膜的损伤,分析了激光损伤阈值同激光波长、脉冲宽度、材料杂质情况等的关系。

高强度激光作用下材料改性过程中,材料对激光不同特性的响应机制不同,不同物理参量的激光对同种物质的改性机制也是不同的,国内外科学家对此进行了大量的研究,并提出了相应的物理模型:热破坏模型、雪崩电离模型、多光子吸收模型和缺陷诱导模型等。

1.2.2.1 热破坏模型

激光对材料的热破坏主要包括热烧蚀和热爆炸。热烧蚀是指材料表面吸收激光而被加热,产生软化、熔融、汽化,直至电离,形成的蒸气向外高速膨胀喷溅、冲刷带走熔融的液滴或固态颗粒,在材料表面造成凹坑直至穿孔^[8-10];热爆炸是在激光的作用下材料表层下的温度高于表面温度且以更快的速度汽化,或者汽化温度低的下层材料先汽化,这两种现象都会在材料内部产生很高的压力,从而发生爆炸^[11-14]。热破坏主要分为本征吸收引起的热破坏和杂质缺陷引起的热破坏。

T. Qiu 等^[15]采用双温方程研究了短脉宽激光脉冲对金属的加热现象,以及金属对入射激光脉冲脉宽的响应。赵建君等^[16]得到了圆柱形光学材料的二维温度场和热应力的解析解,从而分析了重复脉冲作用下热应力对 K9 玻璃的损伤。

1.2.2.2 雪崩电离模型

雪崩电离击穿也常常被称为碰撞电离击穿,是透明超纯固体材料破坏的最可能的机制之一。

光学材料破坏的雪崩模型是 Bloembergen^[8]从早期的直流电子雪崩击穿概念中引入的。该模型可描述如下:位于导带中的电子吸收入射光子的能量后动能增加,若吸收光子的能量足够大,该电子就可能与价电子碰撞使其离化,这样一个导带中的电子就变成两个。这两个电子重复上述过程,最终使导带电子数剧增,直至在样品局部区域形成强烈吸收激光的等离子体,然后通过等离子体与后续激光的相互作用,使材料发生灾难性破坏。

陆建等^[17]认为在样本表面的缺陷、杂质以及样本表面空气中存在少量的自由电子,正是这部分电子做种子电子,引起雪崩电离击穿。当一束脉宽为 τ_p 的激光脉冲作用在样本上时,初始自由电子吸收入射的激光能量使自由电子密度 N_e 成指数形式增加^[18]:

$$N_e = N_{e0} \exp(vt) \quad (1-1)$$

式中: N_{e0} 为初始自由电子密度; v 为原子或分子的电离速率。

当 N_e 达到临界值时便发生光学击穿。

1.2.2.3 多光子吸收模型

多光子吸收电离破坏与雪崩电离击穿破坏具有一定的相似性,都是由导带电子数急剧增加导致材料损伤形成的,只是这种破坏引起的导带电子数增加的原因是价带电子对激光的多光子吸收^[19]。目前,多光子吸收离化过程仅考虑到它对初始自由电子的贡献。如果多光子吸收产生自由电子的速率比碰撞电离产生的还要快,比如,当激光波长较短时,光子能量增加,对吸收截面较大的多光子吸收过程就容易发生,这时的多光子吸收电离就对破坏过程起着主要的作用。研究表明,当入射激光的光子能量约为材料带隙能量的 $1/3$ 时,多光子吸收会对价带电子的电离过程产生重要作用。由于对电介质材料能带结构缺乏足够的了解,研究多光子电离理论具有一定的困难,目前的研究大都局限于双光子吸收的过程,而且基本上都是半定量的。

对于纳秒或皮秒范围的长脉冲,破坏主要是由雪崩电离引起的,而对于 $\tau < 100$ fs 的低飞秒脉宽脉冲,破坏主要是由多光子吸收引起的^[20,21]。

1.2.2.4 缺陷诱导模型

晶体、玻璃等光学材料本身含有微裂纹、内部包裹物等大量缺陷,在抛光时会产生一些微裂纹、亚表面和抛光粉残留等缺陷。当入射激光照射在样品上时,