



# 激光束与材料相互作用的 物理原理及应用

(德) M. Von 奥尔曼 著

科学出版社

# 激光束与材料相互作用的 物理原理及应用

〔德〕M. Von 奥尔曼 著

漆海滨 胡洪波 译  
谢柏林 彭 健

科 学 出 版 社

1 9 9 4

(京)新登字 092 号

## 内 容 简 介

激光束与材料的相互作用涉及激光物理、原子与分子物理、等离子体物理、固体与半导体物理、物理力学、连续介质力学、爆炸力学及材料科学等,正在形成一门新型的交叉学科。本书系统而简要地介绍了激光束与材料相互作用所涉及的理论基础和应用工艺的发展概况,并对新近的重要进展作了概略的叙述和评论。全书共分五章:第一章导论;第二章激光的吸收;第三章激光加热;第四章熔化和固化;第五章气化和等离子体的形成。本书将使读者对该学科的发展有一个全面而深入的了解。

本书可供涉及激光加工、激光效应的基础理论、实验和工业应用等方面的科研和工程技术人员、高等院校有关专业的师生和研究生参考。

M. Von Allmen

## LASER-BEAM INTERACTIONS WITH MATERIALS PHYSICAL PRINCIPLES AND APPLICATIONS

Springer-Verlag Berlin Heidelberg 1987

### 激光束与材料相互作用的 物理原理及应用

[德] M. Von 奥尔曼 著

漆海滨 胡洪波 译  
谢柏林 彭 健

责任编辑 王昌泰

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

\*

1994 年 7 月第 一 版 开本:787×1092 1/32

1994 年 7 月第一次印刷 印张:71/8

印数:1-1 000

字数:157 000

ISBN 7-03-004039-2/O·707

定价: 7.00 元

## 译 者 的 话

自 1960 年激光问世以来,激光与材料的相互作用一直是人们非常关心的问题。从工业上的激光加工应用技术,到军事上的激光破坏机理研究,均与之密切相关。它在激光加工应用等领域中的诱人前景,激励着这方面的研究工作不断取得进展,尤其是 70 年代后期以来,进展更为迅速。

激光与材料的相互作用,涉及激光物理、原子与分子物理、等离子体物理、固体与半导体物理、物理力学、连续介质力学、爆炸力学以及材料科学等广泛的学科领域,正在形成高技术范畴内多学科相互渗透的一门新型边缘学科。目前,它主要在理论基础和应用工艺两个方面迅速向前发展。

M. von 奥尔曼的这部专著,系统而简要地介绍了激光与材料相互作用所涉及的理论基础和应用工艺的发展概况,并对新近的重要进展作了概略叙述和评论,还给出了大量参考文献目录。读者阅读本书后,对此学科领域的发展会得到较为全面的了解,而且本书还为那些愿在此领域进行深入探讨的读者提供了丰富的参考文献,因而本书颇具特色,是一部篇幅小、涉猎广泛、信息量大的专著,可供涉及激光加工、激光效应的基础理论、实验研究和工业应用等多方面的科研和工程技术人员、高校教师、高年级大学生和研究生参考。

参加本书翻译工作的有漆海滨(序和第一、二章)、胡洪波(第三章和附录)、谢柏林(第四章)、彭健(第五章)。赵伊君教授和张正文副教授对翻译工作给予了大力支持和精心指导。

由于水平有限,译文中的错误和不妥之处实所难免,欢迎广大读者批评指正。

## 序

激光在高分辨率光谱学和船舶导航等各种领域中已经证明是有用的，因而当前受到了材料科学家和工程师们的普遍欢迎。激光作为一种能量高度集中的多用途“纯”能源，已经成为冶金、半导体工艺和工程中极有吸引力的工具和研究设备。本书从物理学家的角度，探讨激光在材料中引起的各种过程。

激光与材料相互作用的研究涉及到多种学科领域。当激光束作用到材料上时，电磁能首先转化成电子激发能，然后再转化成热能、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方式发生变化。要想了解这一系列现象，就需要物理学几个分支学科的知识。本书对这一领域作了系统的阐述，希望对从事材料研究的工作者和高年级大学生能有所帮助。由于篇幅所限，本书只重点介绍激光在固体（例如薄膜和工艺材料）中引起的效应，而没有涉及激光在气体和液体中引发的化学反应，以及在有机材料或生物体中引起的效应等有关课题。

本书是根据我给柏林大学应用物理系研究生所作的系列讲座的讲稿整理而成的。本书的结构反映了本研究题目所涉及范围的广泛性。第二章主要取材于物理光学，第三章和第四章取材于材料科学，第五章取材于流体力学和等离子体物理。当然，与这些学科有关的专家们会发现，本书对他们从事的专题论述得很少，不过我希望本书从整体上讲至少要达到两个目的：首先，为开始接触激光与物质相互作用这一庞大

而复杂领域的学生和初学者提供入门途径，并指明方向；其次，希望能揭示在专家看来也未必总是显而易见的某些相互关联。不管读者以什么方式指出书中的错误和不当之处，都将受到最热烈的欢迎。

我非常感谢所有为本书做出贡献的人——使我有机会了解他们所做工作的同事们，以及认真阅读初稿并纠正初稿中许多不足的审读者们。最后，如果没有 R. Flück 和 E. Krähenbühl 绘制了大多数插图，并且自始至终进行文书工作；如果没有 H.P. Weber 给予的支持；更重要的是，如果没有我夫人为我调制了一杯杯的咖啡，使我得到休息，本书就不会与读者见面了。

M. von 奥尔曼

1986年8月于伯尔尼

# 目 录

<b>第一章 导论</b> .....	1
§ 1.1 实验概况.....	2
§ 1.2 本书概述.....	3
参考文献.....	4
<b>第二章 激光的吸收</b> .....	6
§ 2.1 基本光学性质.....	6
2.1.1 平面波的传播.....	6
2.1.2 材料的宏观性质.....	9
2.1.3 非金属.....	10
2.1.4 金属.....	14
§ 2.2 修正后的光学性质.....	17
2.2.1 自聚焦.....	18
2.2.2 自由载流子效应.....	22
2.2.3 半导体.....	23
2.2.4 绝缘体.....	31
2.2.5 热金属的反射.....	35
§ 2.3 相变与形变效应.....	37
2.3.1 表面皱纹.....	37
2.3.2 钻孔.....	40
2.3.3 汽化和等离子体效应.....	41
参考文献.....	43
<b>第三章 激光加热</b> .....	48
§ 3.1 温度分布.....	49
3.1.1 热化和热传递.....	49

3.1.2	热流方程的解	51
3.1.3	冷却	55
3.1.4	运动光源	56
3.1.5	可变参数	57
3.1.6	吸收现象对温度的影响	60
§3.2	热处理过程	63
3.2.1	激光退火	63
3.2.2	热应力	65
3.2.3	无定形半导体层的结晶化	67
3.2.4	化合物的合成	71
3.2.5	变换硬化	75
	参考文献	77
<b>第四章</b>	<b>熔化和固化</b>	<b>81</b>
§ 4.1	基本原理	83
4.1.1	激光再熔法	83
4.1.2	热流和潜热	85
4.1.3	热力学	92
4.1.4	界面动力学	95
4.1.5	核化	98
§ 4.2	离子注入基片的再生长	100
4.2.1	半导体基片	101
4.2.2	偏析和截陷	105
4.2.3	金属基片	111
§ 4.3	表面合金化	115
4.3.1	半导体基片	115
4.3.2	结构过冷	117
4.3.3	金属基片	125
§ 4.4	熔化淬火	129
4.4.1	玻璃体的形成	130
4.4.2	硅基系统	137



4.4.3 金属基系统 .....	138
参考文献 .....	139
<b>第五章 气化和等离子体的形成</b> .....	<b>146</b>
§ 5.1 基本原理 .....	147
5.1.1 气化的热力学和动力学 .....	147
5.1.2 流体力学 .....	153
5.1.3 蒸气的电离 .....	154
5.1.4 气体击穿 .....	156
§ 5.2 中等辐照度下的气化 .....	157
5.2.1 光束加热和气化 .....	157
5.2.2 蒸气的膨胀和反冲 .....	161
5.2.3 钻孔、焊接、切割 .....	164
钻孔 .....	164
熔透焊接 .....	168
切割 .....	171
§ 5.3 吸收波 .....	171
5.3.1 激光支持的燃烧波 .....	174
5.3.2 等离子体增强耦合 .....	178
5.3.3 激光支持的爆轰波 .....	182
5.3.4 LSDW 对光束与材料相互作用的影响 .....	185
§ 5.4 极高辐照度下的现象 .....	188
5.4.1 自调节等离子体 .....	190
5.4.2 激光驱动的爆燃波 .....	193
5.4.3 惯性约束 .....	195
5.4.4 截止密度下的吸收 .....	196
参考文献 .....	197
<b>附录</b> .....	<b>201</b>
A.1 精选的材料数据 .....	201
A.2 解热流方程用的 Green 函数 .....	207
A.3 热流方程的数值解 .....	210

A.4 单位和符号 .....	211
A.4.1 常数 .....	212
A.4.2 变量 .....	212
A.4.3 下标 .....	215
参考文献 .....	215

## 第一章 导 论

从某种意义上来说,激光束所表现出的特性是材料科学家梦寐以求的:可以将高度集中的“纯”能量,按所需的位置和时间,以预定的量值,准确地投射到几乎是任何材料上。正因为如此,激光一经出现,就必然在材料科学中得到应用。当然,正如我们将要讨论的,实际情况要复杂得多。尽管如此,在未来的相当长的时间里,利用激光使材料发生改变的宏伟前景,无疑将会继续吸引材料科学家和工程师们的注意力。

回顾历史可知,这一领域的进程,受到激光技术本身发展的强烈影响。1960年,第一台红宝石激光器一经问世,就开始了材料激光效应的实验研究。由于早期激光器的再现性和光束质量较差,这项工作在很大程度上是定性的,主要用来研究材料的气化。在这种研究中,激光能量的精确量值并不是关键的。红宝石激光器很快就受到新研制的Nd激光器(钕钇铝石榴子石或钕玻璃)的挑战。新型激光器的性能更稳定,输出光束的光学特性更好,不过它们输出的不是可见光,而是近红外光,许多材料很难吸收这种光。近来,随着激光器和其他设备的不断改进,使材料的可控熔化(无气化)实验得以实现,故半导体和薄膜材料的激光加工越来越引起人们的极大兴趣。70年代末以来,大量文献记载了有关这方面的研究<sup>[1]</sup>。

Nd激光器与红宝石激光器不同之处还在于,它可以连续工作,可以对材料进行连续的(而不是脉冲的)加工处理<sup>[2]</sup>。然而,现在工业上选用的连续运转的激光器是CO<sub>2</sub>激光器<sup>[3]</sup>,它的能量转换效率要比现有的固体激光器高出几个数量级,这

1107223

就补偿了它在中红外波长上工作的不足。另一种常用的连续工作的激光器是 Ar 激光器,它发出绿光,但它的转换效率很低,不能大功率运转。准分子激光器是一种最有希望的新型激光器。这是一种脉冲激光器,它发出紫外光,极易被金属和半导体所吸收,并且既可以大功率运转又有令人满意的转换效率<sup>[4]</sup>。随着准分子激光器的不断完善,价格不断降低,它可望取代目前用于材料加工的许多种脉冲激光器。

粒子束与激光束一样,也是一种可以用作材料加工的能源,中等能量的电子束尤其如此。就吸收而论,它们有一定的优越性<sup>[5]</sup>,现在可以得到的粒子束装置能够给出适合于材料高效率加工的脉冲能量或连续波功率。如把现有材料吸收的差异考虑在内,我们会发现,电子束在材料中引起的效应与激光辐照所引起的效应实际上是相同的。粒子束的明显不足是,硬设备昂贵,而且加工过程必须在真空中进行。

### § 1.1 实验概况

要完成一项激光与材料相互作用的实验,除需诊断元件外,还需要三种基本设备:激光器、光束传输系统和样品或工件的固定装置。从专业期刊<sup>[6]</sup>中,可以查到适用于材料加工的激光器的类型和许多专用设备的资料。一个典型的实验室光束传输系统就是一个简单的透镜和一组用来调节光束功率的衰减器,而工业中所用的系统通常包括复杂的可调反射镜和透镜系统,以引导光束射向工作区域中的任意指定位置。在高功率应用的场合,传输系统通常装有防护装置以保护光束碰撞区,比如用来防止碎片损坏屏幕或者保护惰性气体喷管。为了保证操作者不至暴露于激光束和飞溅物之下,任何情况下都应采取必要的安全防护措施<sup>[7]</sup>。

在实验室实验中,样品固定装置一般是一个可调平台,有时还配有自动扫描装置和显微镜。通常是利用 x-y 平移平台进行线性扫描,或利用某种可旋转平台进行圆形扫描。某些实验(例如涉及到反应物质的那些实验),必须在真空或惰性气体中进行,这就要将样品固定装置置于一个合适的容器内,而激光束则通过光学窗口被引入容器中。

在设计激光与固体相互作用的实验时,还需考虑一个重要的问题,那就是诊断技术。在定量研究工作中,要使用适当标定的探测器来监测光束的功率或脉冲能量。目前,关于强光吸收机理的大部分知识,都是通过监测(实时)样品对激光的反射和透射而取得的。在激光加工现场经常采用的其它诊断技术有:发射光的光谱(包括高温测量)、样品瞬态温度或热传导的测量、热辐射的测量以及声学测量。还有一些更加昂贵的技术,如样品裂解产物的实时质谱测量、现场 Auger 或 Rutherford 后向散射光谱和时间分辨 X 射线衍射等。利用这些实验设备可以获得许多实时信息,实验之后,材料科学家用现有的各种分析技术对被辐照过的材料进行检验,自然又可以获得许多补充信息。

## § 1.2 本书概述

本专著介绍激光在金属、半导体和绝缘体中产生的效应,重点介绍工程材料和结构。本书并不是一本使用手册(尽管给出了一些特殊加工过程的技术信息),而是给出能制订使用手册的具体知识。某些有关的课题,比如激光在气体和液体中引发的化学反应<sup>[6]</sup>,以及激光在有机物或生物体中引起的效应,则不在本书范围之内。

本书共有五章。第一章为导论。第二章讨论固体中的光

吸收。强激光束照射物体时，通过一些效应物体的光学性质将发生改变，本章用大部分篇幅研究这些效应，从简单的加热，到自由载流子的产生，直到非线性折射率现象。本章还将讨论由于宏观现象(如熔化和表面起皱)引起的耦合效应。

后三章将讨论由于吸收激光而发生的现象，大致按照样品温度和能量密度增加的顺序安排。第三章讨论中等功率连续激光束辐照下固体的热过程，其中有一节专门介绍不同辐照条件和材料响应下，样品温度的解析计算，接着讨论目前感兴趣的各种过程。第四章讨论各种形式的激光再熔化。为了强调在这一领域中观察到的各种现象之间的内在联系，在描述它们的应用之前，专门有一节讨论建模(包括数值模拟)方法，并对熔化、凝固以及相的形成进行了介绍。最后，第五章讨论极高能量激光效应：气化和电离。为了便于理解，本章仍有一节介绍基本原理，然后其余各节讨论各种激光强度下所发生的现象——从钻孔和焊接直到热核聚变等离子体的产生。

### 参 考 文 献

- [1] 在欧洲和美国材料研究学会的年度专题文集中可找到有价值的、典型的跨学科的段落。  
F. R. Ausseneg, A. Leitner, M. E. Lippitsch (eds.): *Surface Studies with Lasers*, Springer Ser. Chem. Phys., Vol. 33 (Springer, Berlin, Heidelberg 1983).  
D. Bäuerle (ed.): *Laser Processing and Diagnostics*, Springer Ser. Chem. Phys., Vol. 39 (Springer, Berlin, Heidelberg 1984).  
G. A. Mourou, D. M. Bloom, C.-H. Lee (eds.): *Picosecond Electronics and Optoelectronics*, Springer Ser. Electrophys., Vol. 21 (Springer, Berlin, Heidelberg 1985).  
M. J. Kelly, C. Weisbuch (eds.): *The Physics and Fabrication of Microstructures and Microdevices*, Springer Proc. Phys., Vol. 13 (Springer, Berlin, Heidelberg 1986).
- [2] W. Koechner: *Solid-State Laser Engineering*, 2nd ed., Springer

- Ser. Opt. Sci., Vol. 1 (Springer, Berlin, Heidelberg 1987).
- [3] W. Witteman: CO<sub>2</sub> Lasers, Springer Ser. Opt. Sci. (Springer, Berlin, Heidelberg 1987).
  - [4] Ch. K. Rhodes (ed.): Excimer Lasers, 2nd. ed., Topics Appl. Phys., Vol. 30 (Springer, Berlin, Heidelberg 1984).
  - [5] M. von Allmen: In Laser Annealing of Semiconductors, ed. by J. M. Poate, J. W. Mayer (Academic, New York 1982), pp. 43—74.
  - [6] 見杂志 Laser Focus (Advanced Technology, Littleton, Mass.) and Lasers and Applications (High-Tech Publications, Torrance, Calif.).
  - [7] D. C. Winburn, G. Gomez: Practical Laser Safety (Dekker, New York 1985).
  - [8] D. Bäuerle: Chemical Processing with Lasers, Springer Ser. Mater. Sci., Vol. 1 (Springer Berlin, Heidelberg 1986).

## 第二章 激光的吸收

激光必须首先被材料吸收，才能引起后续的效应。说起来似乎很简单，可实际上，在激光加工中，吸收往往是最严格、最麻烦的一步。人们对于不同条件下激光吸收的机理，已经进行了大量的研究工作。这些工作成果，对于研究材料的激光处理很有用处。

可以把吸收过程看成是材料内部的次级能“源”。在入射光束的作用下，它按自己的动力学规律发展，可能背离普通的光学规律。正是这种“次级”能源（而不是激光装置发射的光束），决定了被辐照材料所发生的现象。

§2.1 重温了已有的知识，并做为后续讨论的基础。这一节扼要回顾了众所周知的与吸收有关的凝聚态物质的光学性质。后两节分别从原子的角度和宏观材料响应的角度，讨论强激光辐照影响光学行为的模式。

### § 2.1 基本光学性质

#### 2.1.1 平面波的传播

光\*的最简单的形式是单色的、线偏振的平面波。在大多数情况下，真实的激光束与上述形式极为近似。在均匀的、无吸收的介质中，光波传播的电场可以表示为

$$E = E_0 \exp[i((2\pi z/\lambda) - \omega t)], \quad (2.1)$$

---

\* 此处和以后的讨论中，我们一般认为“光学”和“光”这两个名词，包含了目前在激光材料加工中所感兴趣的整个光波段(大约是  $0.1-10\mu\text{m}$ )。



式中  $z$  是沿着光传播方向的坐标轴,  $\omega$  是角频率,  $\lambda$  是波长. 后两个量通过相速度  $c/n_1$  而相互联系, 而  $c$  是光速,  $n_1$  是介质的折射率(真空中  $n_1 = 1$ , 与标准温度和压力下空气的折射率没有多大区别), 其关系式可以写为

$$\lambda = (2\pi/\omega)(c/n_1). \quad (2.2)$$

磁场  $H$  也可以写出与式(2.1)类似的表达式. 磁场和电场的幅值之间的关系为

$$H_0 = E_0 n_1 \epsilon_0 c, \quad (2.3)$$

式中  $\epsilon_0$  是真空介电常数. 平均来讲, 电场和磁场携带相等的能量, 但是, 电磁波作用于一个电子上的力为

$$\mathbf{f} = -e[\mathbf{E} + (n_1/c)(\mathbf{V} \times \mathbf{H})]. \quad (2.4)$$

可见, 磁场的贡献比电场的贡献小  $v/c$  倍,  $v$  是电子的速度. 因此, 常忽略磁场对力的贡献. 本书讨论的各种现象, 主要是式(2.4)中的  $-e\mathbf{E}$  项产生的.

单位光波截面上的能量通量称为辐照度\*, 由下式给出:

$$I = |\mathbf{E} \times \mathbf{H}| = n_1 \epsilon_0 c E_0^2. \quad (2.5)$$

用量子力学的语言来说, 频率为  $\omega$ 、辐照度为  $I$  的光波, 对应于能量为  $\hbar\omega$ 、通量为  $I/\hbar\omega$  的光子流. 光与物质相互作用只有某些过程是全量子化的. 然而, 当我们用量子力学来理解这些过程的微观机制时, 由于强激光束中的光子流量是巨大的, 通常可以用经典的概念来描述光束与固体的相互作用现象.

光束概念的含义是, 在光轴附近辐照度最大, 偏离光轴则辐照度减小. 辐照度的横向分布一般是柱面对称的 Gauss 分布,

$$I(r) = I_0 \exp(-r^2/w^2), \quad (2.6)$$

---

\* 通常也用“强度”这个术语, 表示单位立体角上的能量通量.