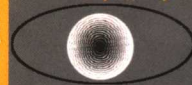


长江科学技术文库

国家“十五”重点  
图书出版规划项目

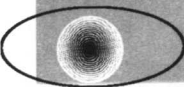


Pulsed Laser Deposition Dynamics  
and Thin Film Deposited onto Glass

# 脉冲激光 沉积动力学 与玻璃基薄膜

张端明 赵修建 李智华 著  
赵青南 关 丽 韩建军

湖北长江出版集团  
湖北科学技术出版社



长江科学技术文库

国家“十五”重点  
图书出版规划项目

# 脉冲激光 沉积动力学 与玻璃基薄膜

Pulsed Laser Deposition Dynamics and Thin Film Deposited onto Glass

湖北长江出版集团  
湖北科学技术出版社

张端明 赵修建 李智华 著  
赵青南 樊英 樊丽 韩建军



图书在版编目(CIP)数据

脉冲激光沉积动力学与玻璃基薄膜 /张端明等著.

武汉: 湖北科学技术出版社, 2006.10

ISBN 7-5352-3665-0

- I. 脉... II. 张... III. ①脉冲(力学)—激光淀积—动力学—研究  
②激光应用—薄膜技术—研究  
IV. ①TN24②TB43

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 115372 号

脉冲激光沉积动力学与玻璃基薄膜

© 张端明 赵修建 李智华 著  
赵青南 关 丽 韩建军

策 划: 李慎谦  
责任编辑: 吴瑞临

封面设计: 王 梅

出版发行: 湖北长江出版集团  
湖北科学技术出版社

电话: 87679468

地 址: 武汉市雄楚大街 268 号  
湖北出版文化城 B 座 12-13 层

邮编: 430070

印 刷: 武汉中远印务有限公司  
督 印: 刘春尧

邮编: 430034

787mm × 960mm

16 开

29.25 印张

480 千字

2006 年 10 月第 1 版

2006 年 10 月第 1 次印刷

ISBN 7-5352-3665-0

定价: 45.00 元

本书如有印装质量问题 可找本社市场部更换

## 内容简介

本书是国际上第一本详细介绍脉冲激光沉积动力学原理的专著。主要介绍了作者建立的反映该技术各个阶段物理过程的统一动力学模型;反映等离子体演化近场、中场和远场行为的基本方程,以及椭球羽辉形成的机制;关于烧蚀阶段中固液相界面动态规律,以及热源项、蒸发项、吸收率动态变化和非傅里叶效应的影响;等离子体薄膜蒙特卡罗 (Monte Carlo) 模拟,以及在生长过程中若干自组织现象规律。

本书完整、深入地总结了作者在自洁净玻璃和空芯光纤的研究中诸多具有独创性的研究成果:在玻璃基上制备具有光催化和节能双重功能的  $\text{TiO}_2$  薄膜和  $\text{TiO}_2/\text{TiN}/\text{TiO}_2$  多层薄膜;制备以石英玻璃毛细管为基的多种高反射薄膜、不同体系的全反射薄膜等多种体系材料,并用于制备空芯光纤。有关材料的制备工艺、性能表征和机制研究具有深远的应用背景。

本书的两部分具有相对的独立性,但是内容彼此呼应,具有内在的逻辑联系,互补性很强,形成完整的科学结构。因此,尽管本书的内容完全取自最新研究成果,但是其系统性和可读性却很强。本书适合于从事材料科学和凝聚态物理研究的科学工作者,也可作为有关领域的博士生或硕士生的教科书和参考书。

## 《长江科学技术文库》编委会

**主 任** 王少阶

**副主任** (按姓氏笔画为序)

王建辉 刘会永 刘健飞 邱久钦

郭生练 路 钢

**委 员** (按姓氏笔画为序)

王少阶 王建辉 方秦汉 宁津生

齐民友 刘会永 刘健飞 朱英国

张文华 张天序 邱久钦 张勇传

李家荣 邱菊生 张端明 郑守仁

周祖德 赵守富 赵修建 郭生练

殷鸿福 夏穗生 黄志远 路 钢

樊明文 樊明武

**总策划** 李慎谦 张端明 (兼)

**策划组成员** (按姓氏笔画为序)

王红斌 史可荣 余永东 夏杨福

## 第一作者简介

张端明，华中科技大学特聘教授，凝聚态-材料物理中心学术委员会主任，博士生导师，湖北省物理协会理事。在特种纳米复合功能材料及激光沉积动力



学、复杂网络拓扑结构及功能、非均匀颗粒系统和非平衡随机动力学、基础量子理论以及有序介质的拓扑理论等领域的研究中，成果卓著。在《美国物理评论》、《应用物理》、《欧洲物理》、《中国物理快报》等权威杂志上发表论文约 210 篇，出版专著及教材 10 本，获国家专利 1 项，主持国家级和省部级科研项目 20 余项。

在科研和教学工作中多次获得国家级、省部级奖励。教授量子场论、规范场论、固体量子场论、铁电和铁磁物理、群论、基本粒子物理学、原子核物理、非线性物理、早期宇宙学、量子力学、热力学与统计物理学等 30 余门课程。历访国际理论物理中心、莫斯科大学、哈佛大学、麻省理工学院、纽约大学、康乃尔大学、宾夕法尼亚大学等，多次参加国际学术会议。

## 第二作者简介

赵修建，武汉理工大学教授。1982年毕业于武汉工业大学，1988年获日本京都大学工学博士学位。现任硅酸盐材料工程教育部重点实验室主任，曾受聘

教育部长江学者特聘教授，任国际玻璃协会技术委员会委员、中国硅酸盐学会常务理事兼特种玻璃分会副理事长。

长期从事玻璃与非晶态材料以及薄膜科学与技术研究。先后研制成功光催化自洁净玻璃、红外偏光玻璃、传输  $\text{CO}_2$  激光用空芯光纤等，获得 19 项国家专利，在国际上最早研制成功具有低辐射与自洁净双重功能的玻璃及一系列多功能集成的建筑玻璃材料。通过化学键调控和采用独特的制备技术，研制了一系列新型红外光学玻璃和非线性光学玻璃，应用前景广阔。探索了一系列具有特殊功能薄膜材料的结构调控和制备方法。在国际学术刊物上发表 150 余篇 SCI 论文，被引用 700 余次，出版著作 5 部。1998 年获国际玻璃协会 Gottardi 学术大奖，2002 年和 2004 年 2 次获湖北省自然科学一等奖，获其他省部级科技奖励 7 项。



## 总 序

科学技术作为“最高意义上的革命力量”，推动社会生产力的急剧发展，乃是人类社会进步的强大动力。科学技术的一次次革命，触发一次次的产业革命，使人类文明一次又一次地攀上更高的峰顶。“科学技术是生产力，而且是第一生产力”已成为当代公众的共识。

当前，一场规模宏伟的高科技革命正以排山倒海之势席卷全球。这场革命其范围之广泛，内容之丰富，发展之迅猛，影响之深刻，更是以往的科技革命所无法比拟的。其直接之后果导致所谓“信息革命”、“知识经济”应运而生。这场新的科学技术革命的三大主角是信息科学技术、材料科学技术和生命科学技术。科技知识空前快捷和广泛地产生、传播和应用，不仅极大地推动经济和社会发展，归根结底，也决定了国家的综合国力和民族的竞争能力。因此，“科教兴国”不仅是现代化建设的需要，更是我们自立于世界民族之林、振兴中华的英明决策。

荆楚大地，人杰地灵，自古以来，人才辈出。不仅创造了瑰丽多姿的楚文化，而且在科学技术方面谱就了一篇篇辉煌乐章。曾侯乙编钟，陆羽的《茶经》，毕昇的活字印刷术，李时珍的《本草纲目》……无不闪耀着智慧的光芒。清末民初，欧风东渐，现代的科技传入中国，湖北省更是开风气之先。尤其是清末张之洞主政湖广，锐意革新，创建学堂，兴办实业。所谓“汉阳造”竟成为当时中国新兴军工的象征；“汉冶萍”公司更是中国近代工业的翘首。因此，民初以来，汉口遂发展成为全国仅次于上海、天津的大商

埠;湖北的近代教育、近代科技、近代产业在当时的中国堪称中坚。

党的十一届三中全会以来,湖北科技界高举邓小平理论伟大旗帜,锐意创新,勇攀高峰,硕果累累,成绩斐然。老一代的硕学鸿儒,春深花茂;一大批功底扎实、奋进不已的中年学者,叶盛枝繁;更加可喜的是,风起云涌的青年才俊更是意气风发,大展宏图。目前湖北省的整体科技实力已跻身于全国“科技强省”之列。

为了进一步贯彻好“科教兴鄂”的战略方针,弘扬科学精神,宣传科学方法,普及科学知识,汇集并宣扬改革开放以来湖北省在科学技术上,尤其是在高科技研究方面所取得的丰硕成果,特组织出版《长江科学技术文库》。本文库的宗旨,在于收录奋战在荆楚大地科研第一线上,并且取得了在国际和国内能够占据一席之地的优秀科研成果的专家教授的新著,兼收并蓄,分卷出版,无分轩轻。文库内容遍及偏微分方程、现代分析理论、随机分析、理论物理、高能物理、原子核物理、高分子材料、纳米材料、大地测量、摄影与遥感、生物地质、作物遗传改良、动物遗传育种、口腔医学、器官移植、激光技术、数控技术、人工智能、水利工程和桥梁建设等等。需要说明的是,应该收录而未进入本文库的专著还很多。其中原因多多,如有的专家工作太忙,近期无暇著书立说;有的专家刚有专著出版;等等。由于湖北科技战线很广,而文库容量有限,挂一漏万,也在所难免,敬请各界同仁见谅。我们希望,这个文库还可以继续出续集,以弥补这些遗憾。

“天行健,君子以自强不息。”愿湖北的广大科技工作者再接再厉,百尺竿头,更进一步,描绘出荆楚大地上更灿烂的科技星空。

《长江科学技术文库》编委会

2003年8月

## 前 言

本书分为上篇和下篇两大部分。两部分具有相对的独立性,但是内容却具备互补性。从某种意义上来说,本书上下篇之间具有逻辑的内在联系,从而形成彼此呼应的完整的结构。

上篇脉冲激光沉积(PLD)技术动力学系统地总结了张端明教授为首的课题组自 20 世纪 90 年代中期以来关于利用 PLD 技术制备钽铌酸钾(KTN)薄膜的一系列实验和理论工作。在上述工作的基础上,广泛吸取了国际同行有关研究的最新成果,该课题组对于 PLD 技术本身的动力学原理进行了系统、全面的研究。本篇就是上述研究成果的一个详尽和深入的综述。可以说,这是国际上第一本关于 PLD 动力学原理研究的专著。

PLD 技术是伴随着激光技术的发展而发展起来的制备薄膜的新型技术。1965 年, H. M. Smith 等人第一次尝试用红宝石激光沉积光学薄膜,但由于激光能量较低,结果并不理想。以后,激光技术不断进步,人们开始用  $\text{CO}_2$  激光和 Nd-Glass 激光制备薄膜。此时激光器的激光波长较长,固体被烧蚀后产生的融液层较深,易产生溅射,因而沉积过程中出现较多的微滴,进而影响薄膜的质量。到 70 年代中期,由于电子 Q 开关的应用,短脉冲激光应运而生,使 PLD 技术取得较大进展。这种激光的功率密度达到并超过  $10^8 \text{ W/cm}^2$ 。由于脉冲持续时间短,使烧蚀的深度变浅,减少了烧蚀物中液体微滴的产生,提高了薄膜的质量,同时也拓宽了被烧蚀材料的可选范围。

1987 年,美国贝尔实验室的 D. Dijkkamp 等人首次成功制备出高温超导薄膜  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ , 采用的就是 PLD 技术(KrF 准分子激光器)。在这一出色工作的带动下,立即在世界范围内掀起了利用 PLD 技术制备高温超导材料及其他材料的薄膜的热潮,PLD 技术获得迅速发展,并且在短短数年之内就发展成最好的制备薄膜的方法之一。

PLD 技术近年来受到广泛关注,其主要优点有:①易获得期望化学计量比的多组分薄膜,即具有良好的保成分性;②沉积速率高,实验周期短,衬

底温度要求低,制备的薄膜均匀;③工艺参数任意调节,对靶材的种类没有限制;④发展潜力巨大,具有极大的兼容性;⑤便于清洁处理,可以制备多种薄膜材料。

近年来,PLD 技术发展的主要趋向是:①高频化,脉冲激光的宽度由纳秒( $1\text{ ns}=10^{-9}\text{ s}$ )迈向皮秒( $1\text{ ps}=10^{-12}\text{ s}$ );②高强度化,脉冲激光的功率密度由  $10^8\text{ W/m}^2$  增到  $10^{13}\text{ W/m}^2$ ,大幅度地提高了制备薄膜的效率,并使制备的薄膜性能更加优良,均匀度更好,致密性更强。

相对 PLD 技术的发展,其动力学机制的研究显得相对落后。自从上世纪 90 年代, R. K. Singh 等提出 PLD 技术制备薄膜过程的三个阶段的物理图像和等离子体演化的基本方程以来,在美国、欧洲以及我国的一些研究单位分别针对烧蚀阶段、等离子体演化阶段和沉积阶段的物理过程进行了研究,有的还取得了相当好的成绩。但总的说来,机制的研究远远落后于实验工艺和实验设备的迅速改进。没有建立起一个能够描述 PLD 动力学过程的基本框架;关于等离子体演化规律和薄膜沉积生长的研究还相当粗糙;关于烧蚀阶段的研究较为深入,但缺乏系统性,尤其不能反映 PLD 技术迅速发展的有关烧蚀机制问题。

本书的上篇在简略介绍功能薄膜及其常用的制备技术的基础上,首先介绍了张端明教授课题组利用 PLD 技术制备 KTN 薄膜的工艺过程,以及对于薄膜性能的表征研究。KTN 薄膜是一种新型光电、铁电功能材料,具有极其优良的非线性光电性质和铁电性质,其应用前景极其广阔。该课题组在其利用 PLD 技术制备薄膜的实验经验的基础上,并参照国际相关的实验和理论研究的文献,建立起能自洽地反映 PLD 技术三个阶段的动力学模型,即所谓 Z-L 模型。然后,详尽地阐述了作者对于纳秒级和皮秒级脉冲激光烧蚀靶材阶段的动力学机制,不断深入研究的成果。这些成果主要是关于烧蚀阶段的深入系统研究,包括固液相界面动态规律;热源项、蒸发项和吸收率的动态变化的影响,尤其是非傅里叶传热规律对于烧蚀的影响;等离子体演化阶段的物理图像和演化规律的研究;建立了可以反映整个演化阶段(近程、中程和远程)的基本方程,等离子体椭球羽辉形成的物理机制和图像;第一次成功实现了 PLD 薄膜生长阶段的蒙特卡罗模拟,揭示了生长过程的物理图像,等等。

除本书的作者外,参与早期实验工作的有王世敏博士,马卫东硕士,王晓东硕士,陈中军硕士,刘素玲硕士,钟志成副教授等;参加近年来的 PLD 技术机制研究的有钟志成副教授,谭新玉博士,李莉博士,杨凤霞博士后,刘丹硕士,侯思普硕士,严文生硕士,韩祥云硕士,魏念博士,郑克玉博士等。

这些工作在 Journal of Applied Physics, America Ceramic Bulletin, Ferroelectrics, Journal of Physica A, Journal of Physica D, Physica A, Europe Physics Journal: Applied Physics, Modern Physics Letter, Surface & Coating Technology, Physica B, Canadian Journal of Physics, Physical State Solids(德国)和中国科学, 科学通报, Chinese Physics Letter, 物理学报, Communication Theoretical Physics 等杂志上发表了 70 余篇论文。

本书的下篇玻璃基功能薄膜则是以赵修建教授为首的课题组多年来研制具有优良性质的自洁净玻璃和空芯光纤的系列工作的完整、深入的总结。

所谓“自洁净玻璃”就是具有优良性能的一种“无需清洁的玻璃”,作为建筑物采光的材料,它不仅具有通常玻璃所具有的透光和遮风避雨的功能,更奇妙的是它还具有自行去污的功能。国际上,自从 20 世纪 80 年代初期就开始了自洁净玻璃的开发,但由于需要玻璃表面涂覆一层一次性的薄膜,使用不方便。直至 20 世纪 90 年代,二氧化钛( $\text{TiO}_2$ )光催化剂的研究已有很大进展,再加上表面处理技术的迅速发展,自洁净玻璃的研究才真正到了目前可实现的程度。由于 20 世纪 90 年代初,人们发现  $\text{TiO}_2$  具有光催化性,即在有光照的情况下它可以起催化剂的作用,几乎可以分解所有有机物,同时对一些无机污物也有分解或处理效果。同时,人们又发现  $\text{TiO}_2$  具有光致超亲水性。因而在玻璃上涂覆一层  $\text{TiO}_2$  薄膜,具有良好的自洁净功能,并有可靠的理论依据。自此以后, $\text{TiO}_2$  薄膜玻璃开发进度发展得非常快,在 2001 年底至 2002 年,在美国的 PPG 公司、英国的皮尔金顿公司和我国的湖北三峡新型建材股份有限公司都相继实现了  $\text{TiO}_2$  薄膜自洁净玻璃的产业化。赵修建教授的课题组在我国  $\text{TiO}_2$  薄膜自洁净玻璃的研制、开发和产业化中,都做出了杰出的贡献。

空芯光纤是目前光纤研究的热点,它以空气作为传输介质,较传统的红外光纤而言,它具有化学和光学性能都比较稳定;传输介质具有高度的均匀性,散射损耗小;光束分散性小,能输出质量优异的光斑;无终端反射;空芯光纤芯散热效率较高;力学性能良好;无毒耐高温,尤其是传输激光功率大(几十乃至几百瓦)等优点。

1981 年日本电子光电技术实验室的 T. Hidaka 等人最早进行空芯光纤的研究。以后,日本、美国和以色列的研究小组在空芯光纤的研究,都取得很好的成绩。日本的一个小组最近还制成了光子晶体材料的空芯光纤。蓝宝石晶体( $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ )和氧化铝都是制备理想空芯光纤的优良材料。

赵修建教授的课题组成功地在玻璃基上制备  $\text{TiO}_2$  薄膜和  $\text{TiO}_2/\text{TiN}/\text{TiO}_2$  多层薄膜,使材料具有了光催化和节能双重功能的优异性能。他们在

我国自洁净玻璃的研制、开发和产业化的过程中,尤其是在掌握有关材料自主开发的知识产权方面,起到了某种先驱的作用。该课题组在石英玻璃毛细管内成功地制备了多种高反射薄膜,可以用于制备性能优良的能传输 $\text{CO}_2$ 激光的空芯光纤;成功地制备了致密的氧化铝、 $\text{SiO}_2$ - $\text{TiO}_2$ - $\text{GeO}_2$ 和 $\text{SiO}_2$ - $\text{GeO}_2$ 等体系的全反射薄膜空芯光纤,所有这些工作都是非常有独创性的。本书的下篇详实地介绍了他们在上述材料的制备研究中,摸索出的优化的制备方法和技术,尤其是详细具体可靠的工艺过程;同时也叙述了该课题组关于这些材料性能的表征和机制的研究。这些富于特色的和具有启发性的研究工作,既有系统性,同时对于相关的研究工作者具有极大的学术价值。本篇的内容除了广泛地参考了国内外在有关领域的专著和研究论文,主要取自作者课题组约70余篇发表在国内外学术杂志上的论文。参与工作的相关研究者,读者可以在相关工作的参考文献中找到。

显然,本书的内容十分丰富博瞻,完全取自作者在相关领域的最新研究成果,并且这些研究都是具有很强的系统性。上篇的内容以理论研究为主,也包括作者相关的实验工作,但量较小。而下篇的内容则以实验制备的研究为主,也包括作者对机制的探讨,相对而言量也不大。因而上下两篇的内容的风格各异,重点也不同,但从逻辑结构来说,两篇却正好相互补充。例如上篇比较完整,概略地介绍了薄膜的一般制备方法,目的是给予读者制备技术的全貌,而且重点阐述了PLD技术的设备和工艺。下篇则结合作者的具体工作,详尽介绍了磁控溅射的设备和工艺,溶胶-凝胶法的制备工艺等。本书上下篇基本上比较全面地、深入地介绍了主要的薄膜制备工艺,而且没有重复内容。

关于材料物理和化学,凝聚态物理的有关著作,往往有所侧重,非偏于理论探索,则倚重实验研究。本书则不然,通观全书,既具有出色的实验制备的研究,也具有新颖透彻理论的探讨,比较均衡。无论对相关领域的实验工作者还是理论工作者,都具有极好的参考价值。仁者见仁,智者见智。不同的研究工作者都会在这本书中看到,研究工作是如何站在研究的最前沿,步步深入,不断向前推进的,从方法论上也是可以有所借鉴的。上篇是非常前沿、严格的热点理论探讨,下篇则为十分出色、平实的应用实验研究。这种奇妙的结合,十分难得,又十分可贵。我们希望,无论对于相关领域的自然科学工作者,还是对于刚刚步入研究阶段的硕士生、博士生,本书都是特色鲜明的难得一见的参考书。

本书的上篇(第1~8章)由张端明、李智华、关丽撰写。其中第1章“薄膜材料与制备方法引论”,第2章“薄膜的缺陷和界面与实验表征”和第7章

“薄膜生长过程研究”由关丽初稿,第3章“脉冲激光沉积技术及其 Z-L 模型一般描述”,第4章“激光烧蚀的基本模型与含热源项模型”,第5章“含蒸发项和热源项的以及靶材吸收率烧蚀模型”,第6章“等离子体的演化及冲击波规律研究”,第8章“相爆炸和 PLD 技术机制研究最新进展”由李智华初稿。上篇由张端明教授修改、润色、统稿、定稿。下篇(第9~16章)由赵修建、赵青南、韩建军撰写。其中,第9章“ $\text{TiO}_2$  薄膜光催化自洁净玻璃的溶胶-凝胶技术制备研究”,第13章“全反射与全反射薄膜空芯光纤”和第16章“ $\text{GeO}_2$  基全反射薄膜空芯光纤的制备研究”由赵修建初稿,第10章“ $\text{TiO}_2$  薄膜的磁控溅射法制备”,第11章“玻璃基  $\text{TiO}_2/\text{TiN}/\text{TiO}_2$  多层膜的溅射制备”和第15章“致密氧化铝薄膜全反射空芯光纤的研究”由赵青南初稿,第12章“石英玻璃毛细管内高反射薄膜的制备”,第14章“毛细管内薄膜制备技术的研究”由韩建军初稿。下篇由赵修建教授统稿、定稿。全书最后由张端明教授和赵修建教授统稿、定稿。

# 目 录

|           |     |
|-----------|-----|
| 总 序 ..... | I   |
| 前 言 ..... | III |

## 上 篇 脉冲激光沉积动力学

|                                   |    |
|-----------------------------------|----|
| 第 1 章 薄膜材料与制备方法引论 .....           | 3  |
| 1.1 薄膜材料的特点 .....                 | 3  |
| 1.2 常见的薄膜材料 .....                 | 4  |
| 1.2.1 结构薄膜材料 .....                | 4  |
| 1.2.2 功能薄膜材料 .....                | 6  |
| 1.3 铁电薄膜材料 .....                  | 9  |
| 1.3.1 铁电薄膜材料的结构、性能与应用 .....       | 10 |
| 1.3.2 铁电薄膜制备 .....                | 12 |
| 1.4 钽铌酸钾铁电薄膜材料 .....              | 13 |
| 1.4.1 KTN 材料的结构与相变 .....          | 14 |
| 1.4.2 KTN 材料的介电与铁电性能 .....        | 15 |
| 1.4.3 KTN 薄膜的制备、实验研究现状及发展趋势 ..... | 16 |
| 1.5 常见的薄膜制备方法 .....               | 21 |
| 1.5.1 真空蒸发沉积 .....                | 22 |
| 1.5.2 分子束外延法 .....                | 22 |
| 1.5.3 溶胶-凝胶法 .....                | 23 |
| 1.6 溅射法 .....                     | 24 |
| 参考文献 .....                        | 26 |

|                                        |    |
|----------------------------------------|----|
| <b>第2章 薄膜的缺陷和界面的实验表征</b> .....         | 32 |
| 2.1 薄膜的缺陷 .....                        | 32 |
| 2.1.1 点缺陷 .....                        | 32 |
| 2.1.2 线缺陷 .....                        | 34 |
| 2.2 薄膜的界面与薄膜间的相互扩散 .....               | 37 |
| 2.2.1 薄膜与衬底间的界面 .....                  | 38 |
| 2.2.2 不同材料薄膜之间的界面 .....                | 39 |
| 2.3 常见的实验表征方法 .....                    | 41 |
| 2.4 X射线衍射分析 .....                      | 43 |
| 2.5 扫描隧道显微镜 .....                      | 46 |
| 2.6 扫描近场光学显微镜 .....                    | 52 |
| 参考文献 .....                             | 55 |
| <br>                                   |    |
| <b>第3章 脉冲激光沉积技术及其 Z-L 模型一般描述</b> ..... | 60 |
| 3.1 PLD 技术发展过程 .....                   | 60 |
| 3.2 PLD 技术制备薄膜的实验工艺 .....              | 63 |
| 3.3 PLD 技术制备过程的一般描述 .....              | 68 |
| 3.3.1 PLD 技术的物理图像的一般描述 .....           | 68 |
| 3.3.2 激光与靶材的相互作用 .....                 | 69 |
| 3.3.3 等离子体膨胀 .....                     | 72 |
| 3.3.4 衬底上沉积成膜 .....                    | 74 |
| 3.4 PLD 技术的 Z-L 模型简介 .....             | 74 |
| 3.4.1 脉冲激光烧蚀靶材过程的描述 .....              | 75 |
| 3.4.2 等离子体的空间膨胀过程研究 .....              | 77 |
| 3.4.3 薄膜沉积特性研究 .....                   | 78 |
| 3.4.4 等离子体冲击波模型 .....                  | 78 |
| 参考文献 .....                             | 80 |
| <br>                                   |    |
| <b>第4章 激光烧蚀的基本模型与含热源项模型</b> .....      | 84 |
| 4.1 激光烧蚀产生的烧蚀面的位置演化规律 .....            | 85 |
| 4.1.1 烧蚀过程的基本物理图像 .....                | 85 |
| 4.1.2 烧蚀面的位置演化规律 .....                 | 86 |
| 4.2 烧蚀方程的导热方程和定解条件 .....               | 88 |
| 4.2.1 导热方程与定解条件 .....                  | 88 |

|                                  |     |
|----------------------------------|-----|
| 4.2.2 边界条件的非线性 .....             | 89  |
| 4.2.3 积分法 .....                  | 90  |
| 4.3 液相区和固相区的温度演化规律 .....         | 91  |
| 4.3.1 液相区温度演化规律 .....            | 91  |
| 4.3.2 固相区温度演化规律 .....            | 91  |
| 4.4 蒸发弛豫过程对烧蚀面的影响 .....          | 95  |
| 4.4.1 激光烧蚀能量阈值、弛豫时间 .....        | 96  |
| 4.4.2 烧蚀面位置的演化规律 .....           | 96  |
| 4.5 含热源项的激光烧蚀导热理论模型 .....        | 97  |
| 4.5.1 导热方程 .....                 | 97  |
| 4.5.2 熔融前的定解条件 .....             | 97  |
| 4.5.3 熔融后的定解条件 .....             | 98  |
| 4.6 靶材熔融前的温度分布演化规律 .....         | 99  |
| 4.6.1 靶材熔融前温度分布的差分模拟研究 .....     | 99  |
| 4.6.2 靶材熔融前温度随位置的分布规律 .....      | 100 |
| 4.6.3 靶材熔融前温度随时间分布的演化规律 .....    | 101 |
| 4.7 靶材熔融后的温度和界面演化规律 .....        | 102 |
| 4.7.1 固液相的温度演化规律和固液相界面演化规律 ..... | 102 |
| 4.7.2 硅靶材熔融后的温度分布模拟 .....        | 103 |
| 参考文献 .....                       | 105 |

## 第5章 含蒸发项和热源项的以及靶材吸收率烧蚀模型 .....

|                                        |     |
|----------------------------------------|-----|
| 5.1 不同烧蚀阶段的含蒸发项的热传导问题 .....            | 108 |
| 5.1.1 靶材熔融前导热方程和定解条件 .....             | 108 |
| 5.1.2 靶材熔融后且脉冲持续阶段液相的导热方程 .....        | 109 |
| 5.1.3 靶材熔融且脉冲结束后的液相导热方程 .....          | 110 |
| 5.1.4 靶材熔融后固相的导热方程和有关定解条件的讨论 .....     | 110 |
| 5.2 不同烧蚀阶段靶材温度演化及蒸发特性 .....            | 111 |
| 5.2.1 熔融前固相温度分布演化规律 .....              | 111 |
| 5.2.2 熔融后且脉冲持续阶段的液相部分温度演化及蒸发效应研究 ..... | 113 |
| 5.2.3 熔融后脉冲持续阶段的靶材固态部分温度演化 .....       | 115 |
| 5.2.4 脉冲结束后靶材的温度分布及蒸发效应研究 .....        | 116 |
| 5.3 激光烧蚀的动态吸收率 .....                   | 119 |
| 5.3.1 靶材动态吸收率定义式 .....                 | 120 |