

· 中国光谷丛书 ·

15249

工业激光技术

丘军林 程祖海 等 编著

华中科技大学出版社

E-mail: hustpp@wuhan.cngb.com

图书在版编目(CIP)数据

工业激光技术/丘军林 程祖海 主编
武汉:华中科技大学出版社, 2002年3月
ISBN 7-5609-2661-4

I. 工…

II. ①丘… ②程…

III. 激光技术-应用-工业

IV. TN249

工业激光技术

丘军林 程祖海 等编著

责任编辑:傅岚亭
责任校对:蔡晓璐

封面设计:刘 卉
责任监印:张正林

出版发行:华中科技大学出版社

武昌喻家山 邮编:430074 电话:(027)87545012

录 排:华中科技大学出版社照排室

印 刷:湖北省通山县印刷厂

开本:850×1168 1/32 印张:14.25 插页:2

字数:334 000

版次:2002年3月第1版 印次:2002年3月第1次印刷

印数:1—1 000

ISBN 7-5609-2661-4/TN·66

定价:25.00 元

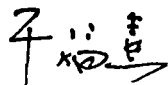
(本书若有印装质量问题,请向出版社发行部调换)

序 言

激光技术在工业上的应用始终是一个十分重要和活跃的领域,特别在材料加工和医学治疗方面。其中高质量的高功率激光器是一个关键,要兼顾到有高的激光功率输出和高的光束传输质量两个方面,是不容易做到的,因此发展工业应用的激光器是激光技术研究的热点。

华中科技大学激光技术国家重点实验室是我国激光技术研究和开发的主要单位,长期从事高功率激光器及其在工业上的应用研究,取得了丰硕的科研和教学成果。本书作者又是该实验室的主要学术带头人,他们深入浅出地介绍了新一代工业激光器的进展,着重总结了该实验室多年来在高频激励 CO_2 激光器、扩散冷却 CO_2 激光器、磁约束放电气体激光器,以及最近他们在二极管半导体激光器泵浦的固体激光器等方面的科研进展,并且从激光器谐振腔技术、相位共轭技术、气动窗口和微变形腔设计等方面,分析了高功率激光器光束质量的提高,均有较高的理论和实验水平,反映了我国工业激光技术的最新研究进展。

采用激光束沉积薄膜是激光技术在功能薄膜制备方法上的新应用,对微电子和光电子薄膜技术有很大的推动。本书作者也系统地介绍和总结了近年来在激光沉积超导薄膜、铁电薄膜和类金刚石薄膜等方面的研究成果,是较有特色的。深信本书的出版将会推动我国工业激光技术及其应用的发展,对从事激光技术研究及其应用的专业人员具有重要的参考和指导价值。



2000 年 12 月

前 言

激光技术国家重点实验室的研究方向是高功率激光器及激光与物质相互作用,主要探索和研究新的激光物理现象和新型高功率激光器;解决好提高高功率激光器光束质量中的关键单元技术和检测技术,对高功率激光中光学、电学、热学和材料等方面应用基础问题进行研究,以期获得高功率、高光束质量、高稳定性、长寿命(“三高一长”)的高功率激光;研究激光与材料相互作用中激光等离子体热力学及微粒子运动的规律,着重解决激光加工、薄膜制备中的关键技术,为激光应用开拓新的领域。

近十年来,实验室紧紧围绕研究方向,立足创新,为国民经济和国防建设的需要服务,取得多项研究成果,其中“针板式 10kW 横流 CO₂ 激光器”和“高功率 CO₂ 激光技术”分别获得国家科技进步奖三等奖,“1 500W 轴快流 CO₂ 激光器”、“1kW 无氮 CO₂ 激光器”、“约束放电激励千瓦级 CO₂ 激光器”、“圆偏振镜”获原国家教委科技进步奖及“国家攻关重大成果奖”,“气动窗口”获保加利亚世界青年发明家博览会金奖。这些研究成果绝大部分已转化为生产力。

本书结合激光技术国家重点实验室 20 世纪 90 年代的研究成果,着重讨论了谐振腔技术、激光器及脉冲激光沉积薄膜技术。本书共分为 14 章,其中上篇为谐振腔技术,讨论了 M^2 参数与光束质量,微变形腔与气动窗口,相位共轭镜与高斯镜谐振腔;中篇为激光器,讨论了高频 CO₂ 激光器,扩散冷却 CO₂ 激光器,约束放电高气压气体激光器,大功率半导体激光器,二极管泵浦 YAG 固体激光器;下篇为脉冲激光沉积薄膜技术,重点讨论了脉冲激光沉积薄膜技术原理,激光沉积超导薄膜,激光沉积类金刚石薄膜。

本书第 1 章由陈培锋教授执笔,第 2、3 章由程祖海、张耀宁教

授执笔,第7章由王新兵副教授执笔,第9章由黄德修教授执笔,第10章由王英副教授执笔,第11章和14章由官文杰副教授执笔,第12章和13章由王又青教授执笔,其余各章及概述由丘军林教授执笔,全书由丘军林教授和程祖海教授统稿。本书请天津大学姚建铨院士主审、激光技术国家重点实验室学术委员会主任干福熹院士作序,在此表示衷心的感谢。

本书的出版得到了华中科技大学科研处及出版社的大力支持,为此表示衷心的感谢。

丘军林 程祖海

2000年12月

FOREWORD

The research direction of the State Key Laboratory of Laser Technology is high power lasers and is interaction with materials. The new phenomenon of laser physics and high power lasers are its main research contents. The basic problems on optics, electrics, thermodynamics and material in high power lasers must be investigated. To obtain high power, high beam quality, high stability and long life lasers, the key unit technology and the detection technology to improved the beam quality of high power lasers must be solved. The basic problemes on optics, electrics, thermodynamics and material in high power lasers must be investigated. To explore the new area of laser application, the characteristics of thermodynamics and the motion of the micro-particle in laser plasma are studied, and the emphasis are to obtain the key technology in laser material processing and films deposition.

In recent ten years, the State Key Laboratory of Laser Technology has obtained many achievements, including "the pin-plate 10kW transverse flow CO₂ laser", "1500W fast axial flow CO₂ laser", "1kW transverse flow CO₂ laser without helium", "1kW CO₂ laser with confined discharge", "Circle polarization mirror" and "aerodynamic window", etc. The government has awarded various prizes to the laboratory for these achievements, and these achievements have been transformed into productivity, evident economics benefits have been obtained.

This book reflects the latest research achievements of the State Key Laboratory of Laser Technology in the fields of industrial lasers and its application during the nineties of 20th century. 14 chapters are contained in the book of "Industrial Laser Technology", and are divided into 3 parts. The first part deals with the technology of laser resonator, including M^2 factor and beam quality, micro-distortion mirrors and crystal window, aerodynamic window, phase conjugated mirrors and Gaussian mirror resonator. The second part is about the various kinds of lasers, these are the high frequency excited CO₂ laser, diffusion cooled CO₂ laser, confined

discharge CO₂ laser with high gas pressure, high power semiconductor lasers and diode pumped solid state laser. The last part is about the technology of film deposition by pulsed lasers, including superconductor film and diamondlike film by pulsed laser ablation, the technology of marking large area uniform film by laser scanning.

Several professors cooperate to write this book. Prof. Chen Peifeng writes the first chapter, Prof. Cheng Zuhai and Prof. Zhang Yaoning write the second and the third chapter, associated professor Wang Xinbing writes the seventh chapter. Prof. Huang Dexiu writes the ninth chapter, associated professor Wang Ying write the tenth chapter, associated professor Guan Wenjie write the eleventh and the fourteenth chapter. Prof. Wang Youqing writes the twelfth and the thirteenth chapter, Prof. Qiu Junlin writes the other chapters and the introduction. Prof. Qiu Junlin and Prof. Cheng Zuhai edit the whole contents of the book. The whole book is examined by Prof. Yao Jianquan (academician) of the Tianjin University, the preface is written by Prof. Gan Fuxi (academician), the president of the academic committee of the State Key Laboratory of Laser Technology, thanks to all them.

Thanks for of Huazhong University of Science and Technology Press to publish this book.

Qiu Junlin, Cheng Zuhai

Dec. 2000

目 录

概述	(1)
----------	-----

上篇 谐振腔技术

第 1 章 M^2 参数与光束质量	(9)
1.1 M^2 参数定义	(10)
1.2 二阶矩定义的光束参量传输变换理论	(14)
1.2.1 D_0 和 θ 通过薄透镜的变换	(14)
1.2.2 与基模高斯光束的比较	(15)
1.2.3 普遍的薄透镜 ABCD 法则	(16)
1.2.4 谐振腔中的谐振光束	(16)
1.2.5 结论	(17)
1.3 二阶矩定义下的广义 ABCD 法则	(17)
1.4 各种典型实际光束的 M^2 参数特性比较	(21)
1.4.1 基模高斯光束具有 M^2 参数的最小值	(21)
1.4.2 M^2 参数的物理含义	(22)
1.4.3 各种典型的实际高功率激光束的 M^2 参数	(23)
1.5 二阶矩定义的光束参量变换理论及其推广的设想	(26)
参考文献	(29)
第 2 章 微变形腔镜及晶体窗口	(31)
2.1 激光腔内光学元件热变形理论模型	(32)
2.1.1 激光作用下腔镜的传热模型	(33)
2.1.2 激光作用下镜片的热变形	(36)
2.1.3 晶体窗口的传热分析	(39)
2.1.4 腔内光学元件热变形对激光光束质量的影响	(40)

2.2	腔内光学元件热变形数值模拟	(48)
2.2.1	有限差分法	(48)
2.2.2	有限元方法	(55)
2.3	腔镜变形的实验研究	(63)
2.3.1	激光作用下水冷铜镜的变形	(63)
2.3.2	激光作用下硅镜的热变形	(66)
2.3.3	相变致冷窗口的热变形	(68)
2.4	微变形腔镜与窗口	(73)
2.4.1	激光超薄多层镜	(73)
2.4.2	相变致冷强激光窗口	(76)
	参考文献	(79)
第3章	气动窗口	(82)
3.1	引言	(82)
3.2	引射加抽气联合式气动窗口的工作原理	(84)
3.2.1	抽气节流式气动窗口的工作原理	(84)
3.2.2	引射式气动窗口的工作原理	(85)
3.3	引射式气动窗口的气动性能	(87)
3.3.1	引射式气动窗口的气体质量流量	(87)
3.3.2	引射喷管出口截面马赫数 M_e	(89)
3.3.3	引射式气动窗口的密封压力比	(90)
3.3.4	计算结果及分析	(96)
3.3.5	计算结果和实验结果的比较	(99)
3.4	引射加抽气联合式气动窗口的工作性能	(100)
3.4.1	联合式气动窗口的密封性能	(101)
3.4.2	联合式气动窗口的光束质量	(102)
3.5	小结	(106)
	参考文献	(107)
第4章	相位共轭镜	(111)
4.1	引言	(111)

4.2	相位共轭原理	(112)
4.3	受激布里渊散射理论	(116)
4.4	相位共轭镜	(119)
4.5	具有光纤相位共轭镜的振荡/放大(MOPA)系统	(125)
4.6	光纤相位共轭镜的保真度和反射率	(127)
	参考文献	(132)
第5章	高斯镜谐振腔	(134)
5.1	引言	(134)
5.2	带热透镜的高斯镜谐振腔的光腔特性 及动态稳定性	(135)
5.2.1	光学矩阵分析	(135)
5.2.2	光学特性参量	(140)
5.2.3	动态稳定性	(144)
5.3	带增益分布的高斯镜谐振腔	(147)
5.3.1	不均匀增益分布及增益饱和	(147)
5.3.2	衍射积分模型	(148)
5.3.3	衍射积分计算及其分析	(152)
5.4	带高斯镜谐振腔的高功率固体激光器	(159)
5.4.1	高斯镜谐振腔和参数设计	(159)
5.4.2	带高斯镜谐振腔固体激光器	(160)
5.4.3	实验结果及讨论	(162)
	参考文献	(163)

中篇 激光器

第6章	高频激励 CO₂ 激光器	(167)
6.1	引言	(167)
6.2	高频放电等离子体理论	(168)
6.3	介质电极的高频放电	(174)

6.4	阻抗匹配网络	(178)
6.5	高频激励 CO_2 激光器结构和输出特性	(179)
	参考文献	(183)
第7章	扩散冷却 CO_2 激光器	(184)
7.1	面积放大与射频放电激励技术	(184)
7.1.1	面积放大概念	(184)
7.1.2	射频放电激励技术	(187)
7.2	平板波导型扩散冷却 CO_2 激光器	(190)
7.2.1	平板波导内场分布和传播常数	(190)
7.2.2	平板波导谐振腔的耦合损失	(191)
7.2.3	平行平面腔的模式特征	(195)
7.2.4	非稳波导混合腔	(196)
7.2.5	千瓦级输出功率平板波导 CO_2 激光器	(198)
7.2.6	高频开关电源激励的扩散冷却 CO_2 激光器	(200)
7.3	同轴结构扩散冷却 CO_2 激光器	(207)
7.3.1	射频功率传输中的阻抗匹配	(208)
7.3.2	复曲面镜倾斜非稳谐振腔	(217)
7.3.3	螺旋型反射镜构成的混合腔	(219)
7.3.4	螺旋角向非稳腔的几何光学分析	(220)
7.4	波导阵列结构	(223)
7.4.1	一维波导阵列结构	(224)
7.4.2	二维波导阵列结构	(225)
7.4.3	平板波导阵列结构	(226)
	参考文献	(231)
第8章	磁约束放电高压气体激光器	(235)
8.1	引言	(235)
8.2	磁约束放电条件下的玻耳兹曼方程	(235)
8.3	高压气体在电磁场作用下电子的运动 及其传输系数	(238)

8.4	高气压气体在磁场作用下的旋转流动	(240)
8.5	磁约束放电激励的 XeCl 准分子激光器	(246)
8.6	磁约束电激励 TEA-CO ₂ 激光器	(250)
	参考文献	(251)
第 9 章	大功率半导体激光器	(253)
9.1	引言	(253)
9.2	量子阱半导体激光器	(256)
9.3	表面发射激光器	(267)
9.4	大功率半导体激光器	(273)
9.5	半导体激光器在应用中的光学耦合系统	(282)
9.6	半导体激光器的驱动电源	(285)
	参考文献	(290)
第 10 章	二极管泵浦的固体激光器	(292)
10.1	引言	(292)
10.2	基本特点	(294)
10.2.1	基本结构	(294)
10.2.2	二极管泵浦源的基本光学特性	(295)
10.2.3	激活介质的尺寸	(298)
10.3	二极管端面泵浦的固体激光器	(299)
10.3.1	泵浦光的耦合	(299)
10.3.2	二极管端面泵浦激光器的特性	(304)
10.4	二极管侧面泵浦的固体激光器	(308)
	参考文献	(311)

下篇 脉冲激光沉积薄膜技术

第 11 章	脉冲激光沉积薄膜技术原理	(317)
11.1	引言	(317)
11.2	激光与固体的作用及所产生的等离子体	(322)
11.2.1	激光与固体的作用	(322)

11.2.2	激光与固体作用产生的等离子体	(326)
11.3	脉冲激光沉积薄膜技术	(334)
11.3.1	脉冲激光沉积薄膜系统及制备	(334)
11.3.2	脉冲激光沉积薄膜技术的新发展	(336)
	参考文献	(338)
第 12 章	激光沉积超导薄膜技术	(341)
12.1	引言	(341)
12.2	在金属基片上激光沉积高温超导薄膜	(342)
12.2.1	激光沉积系统	(344)
12.2.2	金属基片的制备	(345)
12.2.3	金属基片上激光沉积 YSZ/YBCO 超导薄膜 (无离子源辅助)	(345)
12.2.4	金属基片上激光沉积 YSZ/YBCO 超导薄膜 (有离子源辅助)	(359)
12.2.5	离子束辅助沉积取向薄膜的物理机理	(380)
12.2.6	不锈钢基底上激光辅助沉积 YSZ 薄膜	(381)
12.3	超导薄膜微观结构的观察及分析	(383)
12.3.1	单晶基片上的超导薄膜的微观结构观察	(384)
12.3.2	金属基片上的超导薄膜的微观结构观察	(387)
12.3.3	超导薄膜生长结构的讨论	(389)
12.3.4	超导薄膜的微观结构对临界电流密度的影响	(390)
	参考文献	(393)
第 13 章	激光扫描沉积大面积均匀薄膜技术	(399)
13.1	引言	(399)
13.2	激光扫描沉积基本原理	(401)
13.3	激光圆扫描剥离沉积大面积薄膜系统	(403)
13.4	激光复合扫描剥离时的膜厚分布	(413)
	参考文献	(418)
第 14 章	脉冲激光沉积法制备非晶金刚石薄膜技术	(420)

14.1	概述.....	(420)
14.2	脉冲激光蒸发石墨靶产生的碳等离子体的诊断	(423)
14.3	脉冲激光沉积法制备非晶金刚石薄膜技术.....	(425)
14.4	非晶金刚石薄膜的表征.....	(432)
	参考文献.....	(435)

概 述

激光器在工业中的应用,主要是在材料加工及微加工方面,这方面的激光器在销售市场中始终占有重要的地位,并在非二极管激光器的销售中占第一位。工业应用的激光器目前仍然以 CO_2 激光器、灯泵 Nd:YAG 固体激光器及准分子激光器为主。由于半导体激光器的迅速发展,二极管激光泵浦固体激光器(全固化激光器)的应用也获得迅速的发展。工业激光器的发展水平如表 0.1 所示。

表 0.1 工业激光器发展水平

激光器类型	商品水平	实验室水平
①高功率 CO_2 激光器		
横流	10kW(高频)	50kW
轴快流	10kW(射频)	20kW
扩散冷却	2.5kW(射频)	3.5kW
②YAG 固体激光器		
灯泵	2.5kW	5kW
二极管激光泵浦	1kW	6kW
③准分子激光器		
308nm	150W	10kW
248nm	200W	
193nm	125W	
④半导体激光器		
单个	4W	
线阵	40~100W	
面阵	4.8kW(峰值)	

在材料加工的应用中高功率 CO_2 激光器占主导地位,但是高功率 CO_2 激光器已由第一代的直流激励转到第二代的高频或射

频激励,其主要原因是直流激励存在着三个主要问题:①由于放电的不稳定性,限制了注入功率的提高;②在时间上是不能调制的,也就是说不能满足连续一脉冲运行的转换要求;③为了稳定放电,必须加入占消耗能量 $1/3 \sim 1/4$ 的电阻。正因为如此,新一代高功率 CO_2 激光器发展为三种型式:①高频激励 CO_2 激光器,以 Rofin-Sinar 公司的 860HF 型为代表^[1];②射频激励轴快流 CO_2 激光器,以 Struempf 公司的 TLF12000 型为代表^[2];③射频激励扩散冷却板条 CO_2 激光器。华中科技大学激光技术国家重点实验室在 1995 年发展了 1.5kW 高频激励 CO_2 激光器^[3]。除此之外,还发展了磁约束放电直流激励千瓦级 CO_2 激光器^[4],对射频激励和高频激励的扩散冷却 CO_2 激光器也进行了深入的研究^[5,6],对磁约束高压脉冲放电气体激光器也进行了探索^[7]。

对高功率激光器而言,光束质量及谐振腔的稳定性具有十分重要的意义,因此我们对光束质量的评价及提高光束质量的方法进行了较为深入的探讨^[8,9]。对高功率 CO_2 激光器使用了多折腔^[4]和非稳腔^[10],获得了准基模或低阶模的激光输出;为了对高功率 Nd:YAG 固体激光器的热透镜效应进行有效的补偿,采用光纤相位共轭镜的方法可以获得高光束质量高功率固体激光输出^[11],采用可变反射率的谐振腔^[12]也可以获得高斯光束的激光输出。为了提高万瓦级 CO_2 激光器谐振腔的热稳定性,国家实验室进行了微变形镜^[13]及气动窗口^[14]的研究并获得了实际上的应用。

从激光技术发展看,自 1996 年以来半导体(二极管)激光器的销售额已开始超过非二极管激光器,2000 年激光器销售额达到 63 亿美元,其中二极管激光器将占 69%,而非二极管激光占 31%^[15],因此可以说激光器的发展已进入以二极管激光器为主的发展阶段。虽然目前二极管激光器主要应用在信息光电子领域,但随着高功率半导体激光器的发展,二极管激光泵浦高功率固体激光器已经开始采用,并且开始出现了二极管激光泵浦的微片固体激光器,例如二极管激光泵浦的 Yb:YAG 固体激光器输出功率已

达到 1 000W^[18],Nd:YVO₄ 固体激光器,在波长为 1 064nm 的输出功率已达到 20W^[19]。我国上海光机所也在发展 Yb:YAG 微片激光器^[18],中科院物理所也在研究 Nd:YVO₄ 微片激光器^[19]。表 0.2 列出了国外二极管激光泵浦固体激光器的技术发展水平^[20]。

表 0.2 二极管激光泵浦固体激光器发展水平^[16,20]

输出功率/W	光束质量 M^2	效 率		泵浦形式	备 注
		$\eta_{电-光}$	$\eta_{光-光}$		
10	≈ 1		44	微片圆盘	商 品
500				微片圆盘	实验室
1 000	36			横向泵浦棒	商 品
1 000	10			二支泵浦棒	试 品
2 000	50	12	30	横向泵浦二支棒	实验室
3 500		19	35	多棒(4 个腔)	实验室
4 400	36			多棒(8 个腔)	试 品

为了适应激光器的发展,激光技术国家实验室,在原来以发展高功率 CO₂ 激光器为主的研究方向上,又增加了发展高功率固体激光器的任务。从 1998 年开始我们就和德国柏林技术大学光学研究所 H. J. Eichler 教授及 H. Weber 教授合作研究发展二极管激光泵浦固体激光器(全固化激光器),特别是短波长全固化激光器,这种合作已获得德国科技教育部的支持与资助。

准分子激光淀积方法作为一种镀膜技术被人们广泛采用是从 1987 年开始的。一方面这是由于大功率准分子激光器的问世为激光镀膜技术奠定了物质基础;另一方面,高温超导薄膜的研制为这种技术的应用在客观上提供了机会,并使其得到了迅速的发展。美国贝尔实验室于 1987 年最早应用准分子激光沉积高温超导薄膜^[21]。激光技术国家重点实验室是我国最早使用准分子激光沉积高温超导薄膜取得成功的单位。获得了高质量 YBa₂ Cu₃ O_{7-x} 高温