

# 现代光学 制造工程

杨 力 © 主编



科学出版社  
[www.sciencep.com](http://www.sciencep.com)

# 现代光学制造工程

杨 力 主编

科 学 出 版 社

北 京

## 内 容 简 介

本书提出了“现代光学制造工程”学科新概念。把光学加工技术提高到一门交叉工程学科进行研究是本书主题。创新理论、系统论、信息论和控制论等构成本书基础篇。对光学设计、制造、检测、材料及管理等十几个主要学科领域的集成讨论,勾勒出光学-制造科学交叉学科基本特征。学科支撑是一个领域健康发展的基本保证。

本书可供从事光学、光学工程和先进制造技术等领域的学生、教师、科研人员、管理人员以及相关工作人员等参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

现代光学制造工程/杨力主编. —北京: 科学出版社, 2008

ISBN 978-7-03-022518-4

I. 现… II. 杨… III. 光学零件-制造 IV. TH740.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008) 第 104631 号

责任编辑: 胡 凯 刘凤娟 / 责任校对: 陈玉凤

责任印制: 赵德静 / 封面设计: 鑫联必升

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

双青印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2009 年 1 月第 一 版 开本: B5 (720×1000)

2009 年 1 月第一次印刷 印张: 29 1/2

印数: 1—2 500 字数: 670 000

定价: 86.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换〈双青〉)

## 序

光学及其工程学在过去、现在和未来的发展都离不开光学制造技术的支撑。可以说,从有近代光学起,就有光学加工历史与其相伴。当前,科学-工程-制造展现一体化发展趋势,光学制造技术与国家重大基础研究和战略高技术研究发展更趋紧密相关,光学制造已经成长为全球性巨大新兴产业,与此同时,它本身也由一门加工技艺逐步向着一门新的工程学科发展。

《现代光学制造工程》书的作者基于多年的研究积累与思考,从更宽的研究视角出发,从集成创新的高度入手,突破传统上把光学加工技术仅限于一门狭窄的光学零件加工工艺技术层面的讨论,扩展并提升到“现代光学制造工程”(Modern Optical Manufacturing Engineering)这一工程学科的新高度来研究和认知。作者把创新理论,系统论、信息论和控制论等基本概念作为本书的基础篇介绍给读者,反映了作者对于现代光学制造工程研究方法的独到见解。可以说,本书的立意与构思本身就是一种创新。光学制造工程向极端制造前沿的发展,面临着对于制造极限的挑战,理论基础的支撑越来越成为研究工作的生命线,这对于从事光学制造工程研究的读者可能是一种有益的启迪。

该书对于现代光学制造工程的十几个主要学科领域的集成讨论,大体勾勒出了现代光学制造工程学科的整体轮廓,显然,它具有光学与制造科学产生的交叉学科的性质,我们可以称之为光学-制造科学。当然,本书讨论的集成范围仍然有限,学科领域范畴也会不断发展,但是本书提出的光学制造工程学科的基本概念对于光学和制造科学的发展无疑具有重要的理论意义和应用价值。

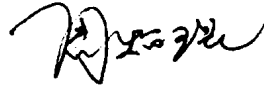
该书主编杨力研究员,博士生导师,国防“973”计划项目专家组成员,中国光学学会光学制造技术专业委员会主任委员。他在2001年主编、科学出版社出版的《先进光学制造技术》一书在本领域颇具影响。《现代光学制造工程》的出版,是作者与合作者们的又一力作,展示了作者研究工作的发展和研究思路的深化。由他主持承办的国际先进光学制造与检测技术学术会议(AOMATT),从2000年起,迄今已在我国成功举办三届,成为国内外影响逐步扩大的重要专题国际学术会议。

该书的出版无疑对于推动光学制造技术的发展和学科建设具有重要意义。由此

联想, 希望能够看到我国光学界有更多这样的创新思维, 创新研究和创新著作, 以提升光学和制造科学在建设创新型国家中的应有地位。

我很荣幸地应邀为该书作序, 并诚挚地向读者推荐这本新书。

清华大学教授, 中国科学院院士  
中国光学学会理事长



2007年12月于北京

## 前 言

“光学加工”是一个广为熟知的经典名词，又称之为“光学生产”、“光学制造”。最近十几年以来，同机械制造领域中的“先进制造技术”概念的提出几乎同步，产生了“先进光学制造技术”概念。用词的变化反映出了光学制造技术三百多年来的发展进程。然而，进一步研究表明，如果仍然把“光学制造”限于一门狭窄的加工技术层面来认知，那就远远不够了。随着科技全球化的驱动，不断创新、突破，交叉与融合，“光学加工”的概念已由经典意义上的一门加工技艺，逐步发展成为现代光科学与制造科学交叉的一门工程学科，即本书提出的“现代光学制造工程”。因此，把光学制造从一门加工技术，提高到一门工程学科进行研究，是本书编著的基本宗旨。

大科学概念的提出，概括了当代科学技术研究发展的大规模工程化特点。大科学研究远超出个人所为，成为一种体系，一种国家行为。研究规模宏大，具有基础性、前沿性、前瞻性、集成性和战略性，体现知识集聚、技术集聚、人才集聚、资金集聚等特点。大科学计划往往与大工程计划密不可分，常称之为科学工程。大工程概念应该包括：重大的战略性工程目标；工程的巨型化、复杂化、集成化，甚至国际化特征；多种相关技术与科学领域的集成、交叉、渗透、融合；对环境保护和可持续发展理念的重视等。在大科学、大工程的需求牵引下发展了大制造。大科学、大工程和大制造呈一体化发展趋势。从一定意义而言，科学发展到哪里，制造就延伸到哪里。因此，以大科学、大工程和大制造为基点研究现代光学制造工程的发展是本书写作的基本指导思想。

“现代光学制造工程”这一命题与“现代光学”紧密相关。现代光学与经典光学的区别可由几个主要特征加以说明：现代光学由于激光的出现而产生的一系列革命性突破；光学从宏观向微观世界研究领域的拓展产生的光电子学、光子学等一系列重大进展；现代光学研究的光波段由可见光向全电磁波范围的不断延伸；现代光学与信息科学的交叉对于社会进步和光学自身发展的积极推动；现代光学与其他研究领域的交叉，促使众多新的交叉学科、边缘学科的诞生和发展，等等。因此，以“现代光学”为基点来研究光学制造，是“现代光学制造工程”这一命题的前提。

顾名思义，“现代光学制造工程”既关注“光学”、又关注“制造”、更关注“工程”，即从单纯研究光学制造技术，扩展到讨论光学制造工程，这是本书力求表达的一种集成创新研究思想和方法。

现代光学制造工程具有显著的极端制造特征，即在极端技术条件要求的背景

下,制造极端尺度或极高功能器件或功能系统的大科学工程。当前,极端光学制造集中体现在巨系统光学制造、超微细光学制造、超精密光学制造和强场(如强能量场)光学制造等领域。“一大一小”几乎形象地概括了现代光学制造工程向两个相反的极端方向上的发展趋势。“一大”,空间尺度无边无际、时间范畴无始无终;“一小”表明“制造”终将把人类社会推进到原子、分子科学技术时代。不言而喻“一大一小”隐含着丰富的学术内涵,例如其中“一小”的广义延伸,不但包括“超微细”、“超精密”,也包括“超短”、“超快”等等概念。“一大一小”这两个极端制造理念是“现代光学制造工程”研究的主题。

创新是一个民族进步的灵魂,是国家兴旺发达的不竭动力。本书花一定篇幅讨论创新理论概要,希望对现代光学制造工程的创新引起关注。

毋庸置疑,光是人类社会生存的一个必要条件,光子作为信息载体、能量载体的特性用来造福人类,仍然具有巨大的发展空间。利用激光作为惯性约束核聚变的驱动器是实现受控核聚变的重大科学预见,钎玻璃激光器制造,即使对于美国这样技术领先国家,也是一项极具挑战性的超大型现代光学制造工程。

除了用于通信和计算之外,光用来加工或制造,极大地丰富了制造手段和制造科学内涵。没有光刻技术的不断进步,就不会有微电子技术领域数十年来按摩尔定律的以每18个月集成度翻一番的速度发展。迄今光学曝光技术仍然是大规模集成电路生产技术的主流。193nm浸没式光刻、波长为13.5nm的极紫外光刻(EUVL)和纳米压印等下一代光刻技术,早已突破100nm极限,正在坚实地向着45~22nm光刻挺进。微电子技术发展历史证明了一个朴实的真理,“科学——没有止境的前沿”(美国Vannevar Bush博士)。

系统论、控制论和信息论不属于任何一个具体的工程科学领域,但它在工程科学范畴中的影响和作用无所不在,作为一门横断科学对于系统工程的研究、统筹、组织和集成具有不可替代的重要作用。简言之,研究光学制造工程不能不依托这“三论”为导向。因此,作者把系统论、控制论和信息论基础集中为本书的一篇,从对这门学科基础概念的学习出发,扩展到指导现代光学制造工程的学科建设和工程实践。作者希望这是对于工程研究的一种有益尝试。

本书是由一群活跃在中国科学院光电技术研究所科研一线的青年博士群体和一些学术带头人共同编著完成,集中反映了现代光学制造工程的最新发展和对于本学科建设的积极思考与探索。本书的编著与出版是一项集体劳动和集成创新的结晶。

清华大学教授、中国科学院院士、中国光学学会理事长周炳琨先生,在百忙之中欣然为本书题写了一篇精辟的序言,表达了周炳琨先生对于光学制造技术发展的密切关注和积极支持。

杨力和张雨东提出了本书编著的创意、布局与总体构思,组织了全书的编著工

作,编写了第1篇“现代光学制造工程概论”。杨力和温尚明还完成了第2篇“创新理论概述”的编写。万勇建、范斌、周家斌等完成了第3篇“现代光学制造工程的系统科学基础的”编著。第4篇“现代光学制造工程主要学科领域”包括12章:第1章“现代光学工程设计”由邢廷文编写;第2章“大型天文望远镜制造工程”由吴永前、万勇建、范斌和侯溪等共同编写;第3章“空间光学制造工程”由吴永前编写;第4章“薄膜光学制造工程”由张云洞编写;第5章“激光光学制造工程”由朋汉林编写;第6章“大规模集成电路光刻设备与光刻技术”由佟军民、胡松编写;第7章“微纳光学制造工程”由赵泽宇、罗先刚编写;第8章“光学、光电子学与光子学元器件制造”由邹雄飞编写;第9章“现代光学材料工程”由方敬忠、刘红编写;第10章“现代光学测试工程”由侯溪、伍凡编写;第11章“光学制造工程的网络化与智能化”由俞敏编写;第12章“现代光学制造工程的先进制造与先进管理理念”由曹学东、吴时彬等编写。杨力完成第5篇“先进制造技术、战略高技术和现代光学制造工程”编著。

万勇建博士担任了全书的整理统稿。万勇建和吴永前博士对于全书进行了审校。

由于本书各篇相对独立,因此全书各篇、章的排序亦自成序列,请予理解。

本书的编写出版得到了中国科学院光电技术研究所领导集体的大力支持。史清白研究员、伍凡研究员和吴时彬研究员对于全书的写作给予了热忱的帮助。离开这些支持和帮助,本书的编写和出版工作是不可能完成的。作者谨在此一并致以由衷的谢意。

杨 力  
2007年12月



# 目 录

第 1 篇 现代光学制造工程概论 .....	杨力	1
第 1 章 构思与创意——关于编著《现代光学制造工程》的若干思考 .....		3
1.1 编著本书的总体指导思想——集成创新、支撑发展 .....		3
1.2 创新、创新、再创新 .....		4
1.3 关于现代光学制造工程的系统科学基础 .....		4
1.4 构建“现代光学制造工程”学科体系的指导思想 .....		4
1.4.1 确立“光学制造”应有的学科地位 .....		4
1.4.2 现代光学制造工程学科概念的提出水到渠成 .....		5
第 2 章 工程科学与现代光学制造工程 .....		6
2.1 工程与工程科学 .....		6
2.1.1 关于“科学-技术-工程” .....		6
2.1.2 工程科学 .....		7
2.2 现代光学制造工程 .....		8
2.2.1 现代光学制造工程的概念、特点与内涵 .....		8
2.2.2 现代光学制造工程的基本讨论范畴 .....		9
2.3 现代光学制造工程概况 .....		10
2.3.1 超大型、超复杂光学制造工程 .....		10
2.3.2 超微细光学制造工程 .....		11
2.3.3 超精密光学制造技术 .....		12
2.3.4 现代光学制造工程主体技术群 .....		14
第 2 篇 创新理论概述 .....	杨力 温尚明	15
第 1 章 创新的概念 .....		17
第 2 章 创新、创造、发现、发明 .....		19
2.1 创新与创造 .....		19
2.2 发现 .....		19

2.3 发明 .....	20
<b>第3章 创新的特点</b> .....	21
3.1 新颖性、首创性和前瞻性 .....	21
3.2 创新的风险性 .....	21
3.3 创新是综合学科知识的集成 .....	22
3.4 创新是集体力量的集中创作和再创作 .....	22
3.5 创新的能动性与执着性 .....	23
<b>第4章 人才与创新</b> .....	24
4.1 创新教育与训练 .....	24
4.2 提高创造性思维能力 .....	24
4.3 提高创新力 .....	26
4.4 掌握创新技法 .....	27
4.5 突破精神束缚 .....	28
4.6 加强创新实践与训练, 提高创新技能 .....	28
4.7 持续创新、立于不败 .....	29
<b>第5章 创新差距</b> .....	30
参考文献 .....	30
<b>第3篇 现代光学制造工程的系统科学基础</b> .....	33
<b>第1章 光学制造工程的系统论基础</b> .....	周家斌 35
1.1 系统思想与理论 .....	35
1.2 一般系统论 .....	35
1.2.1 一般系统论的研究领域 .....	35
1.2.2 (一般)系统论的基本观点 .....	37
1.3 运筹学 .....	38
1.4 系统工程及其方法 .....	41
1.4.1 系统的概念 .....	41
1.4.2 系统工程方法的特点 .....	42
1.4.3 系统工程方法 .....	43
1.5 光学制造系统工程 .....	46
1.5.1 光学制造系统工程内涵 .....	46
1.5.2 光学制造系统工程的知识基础和支撑体系 .....	46

1.5.3 光学制造系统工程与现有工程学科之间的关系	47
参考文献	48
<b>第2章 信息论与光学制造工程</b>	<b>万勇建 49</b>
2.1 信息论	49
2.2 信息论方法	49
2.3 光学制造工程	51
2.4 制造工程的系统信息	51
2.4.1 制造中的信息	51
2.4.2 制造中的物质、信息和控制活动	53
2.5 制造信息本质和属性	55
2.5.1 制造信息本质	55
2.5.2 制造信息属性	56
2.6 光学制造系统与信息	58
2.7 小结	58
参考文献	59
<b>第3章 光学制造工程的控制论基础</b>	<b>范 斌 61</b>
3.1 控制论概述	61
3.2 控制论的发展阶段	63
3.3 控制论中的基本控制方式	64
3.3.1 按有无反馈分类	64
3.3.2 按系统特性分类	64
3.3.3 按系统信号形式分类	65
3.3.4 其他控制方式	65
3.4 控制系统的基本要求	66
3.4.1 稳定性	66
3.4.2 快速性	66
3.4.3 准确性	67
3.5 智能控制	67
3.6 控制论在先进光学制造中的应用	68
3.7 结束语	70
参考文献	70

<b>第 4 篇 现代光学制造工程主要学科领域</b> .....	77
<b>第 1 章 现代光学工程设计</b> ..... 邢廷文	79
1.1 概述.....	79
1.2 光学系统的设计要求.....	79
1.3 光学系统设计.....	81
1.4 光学设计软件.....	83
1.5 光学系统设计展望.....	84
<b>第 2 章 大型天文望远镜制造工程</b> ..... 吴永前 万勇建 范斌 侯溪 等	85
2.1 望远镜光学的进展.....	85
2.2 世界有代表性的天文台与望远镜.....	91
2.3 望远镜主镜现代数控光学加工技术.....	99
2.3.1 小磨头数控加工技术.....	99
2.3.2 CCAL 技术.....	103
2.4 能量束流抛光技术.....	107
2.4.1 磁流变抛光技术.....	107
2.4.2 离子束抛光技术.....	110
2.4.3 液体喷射抛光技术.....	111
2.5 主动支撑辅助加工技术.....	112
2.6 主镜拼接技术.....	119
2.6.1 背景.....	119
2.6.2 共相位拼接原理及方法.....	122
2.6.3 拼接检测仪器.....	128
2.7 现代大型望远镜革命性发展的启迪.....	130
参考文献.....	134
<b>第 3 章 空间光学制造工程</b> ..... 吴永前	138
3.1 前言, 历史.....	138
3.2 空间望远镜的优势.....	139
3.3 空间望远镜的分类.....	140
3.3.1 从应用角度分类.....	140

3.3.2 从工作波段上分类	141
3.4 各国典型的空间望远镜	144
3.4.1 美国	144
3.4.2 欧洲的空间望远镜	153
3.4.3 日本的空间望远镜	156
3.4.4 中国的空间望远镜	156
3.4.5 已经发射或将要发射的太空天文台	157
3.5 空间望远镜光学镜面制造技术	162
3.6 空间望远镜的新技术	163
3.6.1 充气望远镜	163
3.6.2 超轻量反射镜	163
3.6.3 薄膜反射镜	164
3.6.4 压电薄膜	164
3.7 空间望远镜的特点	165
参考文献	165
<b>第4章 薄膜光学制造工程</b> 张云洞	169
4.1 光学薄膜的发展历程	169
4.2 薄膜沉积技术和薄膜材料	170
4.2.1 薄膜沉积技术	170
4.2.2 热蒸发技术	171
4.2.3 溅射技术	173
4.3 薄膜材料	175
4.4 薄膜在光学工程中的应用	178
4.4.1 高能激光薄膜	179
4.4.2 惯性约束聚变(ICF)系统中的抗激光薄膜	179
4.5 从美国激光武器发展看光学薄膜的重要性	183
4.6 半导体平版印刷术中的 DUV/VUV 光学薄膜	187
4.7 EUV/软 X 射线多层膜	191
4.8 精密测量中的光学薄膜	196
4.9 大口径光学元件镀膜	197
4.9.1 工业大面积镀膜	197

4.9.2	大型天文望远镜主镜镀膜	200
4.9.3	光学薄膜的其他应用	201
4.10	小结与展望	201
4.10.1	本章小结	201
4.10.2	21世纪我国光学薄膜发展的展望	202
	参考文献	203
<b>第5章</b>	<b>激光光学制造工程</b>	朋汉林 204
5.1	引论——激光光学制造工程概述	204
5.2	激光光学基础	204
5.2.1	激光	204
5.2.2	激光光束的特性	208
5.2.3	激光制造工程中常用的激光技术	210
5.3	高能激光光学制造工程	214
5.3.1	概述	214
5.3.2	高能激光系统构成	215
5.3.3	国外高能激光系统研究概况	216
5.3.4	惯性约束聚变光学制造工程	218
5.3.5	惯性约束聚变工程光学元件制造	222
5.4	超短超强激光光学制造工程	224
5.4.1	超短超强激光的发展和现状	224
5.4.2	啁啾脉冲放大(CPA)超短超强激光系统	227
5.4.3	光学参量啁啾脉冲放大(OPCPA)超短超强激光系统	230
5.4.4	超短脉冲激光系统光学制造工程	232
	参考文献	233
<b>第6章</b>	<b>大规模集成电路光刻设备与光刻技术</b>	佟军民 胡 松 236
6.1	集成电路的制造与光刻工艺简介	236
6.1.1	集成电路的制造与光刻设备	236
6.1.2	光刻技术工艺流程	237
6.2	光学光刻技术	240
6.2.1	光学光刻技术的分类	240
6.2.2	接触/接近式光刻技术	240

6.2.3	光学投影式光刻技术	241
6.2.4	光学投影光刻机关键单元技术及分系统	249
6.3	分辨力增强技术	256
6.3.1	相移掩模技术	256
6.3.2	离轴照明技术	257
6.3.3	光学邻近效应校正技术	258
6.3.4	光瞳滤波技术	260
6.4	下一代光刻技术	261
6.4.1	193nm 浸没式光刻技术	261
6.4.2	极端远紫外光刻技术	263
6.4.3	纳米压印技术	264
6.4.4	无掩模光刻技术	266
6.4.5	电子束光刻	268
6.4.6	离子束光刻	268
6.4.7	X 射线光刻	269
6.4.8	表面等离子体光学光刻	270
6.5	光刻技术和设备的发展趋势	271
6.5.1	光刻技术的发展趋势	271
6.5.2	光刻设备的发展趋势	272
6.5.3	对我国光刻技术和设备发展的几点建议	273
	参考文献	274
<b>第 7 章</b>	<b>微纳光学制造工程</b>	<b>赵泽宇 罗先刚 276</b>
7.1	MEMS 制造技术	276
7.1.1	MEMS 的定义	276
7.1.2	MEMS 技术的发展现状和发展趋势	277
7.2	MEMS 制造技术	279
7.2.1	表面微机械加工工艺	279
7.2.2	体硅微机械加工工艺	280
7.2.3	LIGA 微机械加工工艺	281
7.2.4	其他微机械加工工艺	282
7.2.5	用于 MEMS 的关键微加工技术	282

7.3 MEMS 技术的应用 .....	291
7.3.1 微传感器 .....	291
7.3.2 微操作器 .....	292
7.3.3 微机电系统 .....	294
7.4 纳米加工技术 .....	295
7.4.1 纳米加工技术的范围 .....	295
7.4.2 纳米压印光刻技术 .....	297
7.4.3 纳米结构图形制作技术 .....	301
参考文献 .....	310
<b>第 8 章 光学、光电子学与光子学元器件制造</b> .....	<b>邹雄飞 313</b>
8.1 光电子概述 .....	313
8.2 光子的特点 .....	313
8.3 世界光电子产业的发展及其状况 .....	314
8.3.1 世界光电子产业的概述 .....	314
8.3.2 欧美或发达国家动态 .....	314
8.3.3 我国光电子产业的现状 .....	315
8.4 光子学器件的分类 .....	316
8.4.1 光电子按产业的分类 .....	316
8.4.2 光子探测器件 .....	317
8.4.3 光电路元器件 .....	318
8.4.4 发光器件 .....	319
8.5 集成光学 .....	320
8.5.1 集成光学的主要应用领域 .....	320
8.5.2 当前光集成的研究热点 .....	321
8.5.3 光集成的分类 .....	321
8.5.4 集成光学器件的材料 .....	322
8.6 光子晶体 .....	324
8.6.1 光子晶体简介 .....	324
8.6.2 光子晶体的特点 .....	324
8.6.3 光子晶体的应用 .....	325
8.6.4 光子晶体的制备 .....	326



8.6.5 光子晶体制作新技术	327
8.7 固体光源	327
8.7.1 固体照明的简介	327
8.7.2 LED 制作的主要工艺	328
8.7.3 用于照明的白光 LED	330
8.7.4 LED 的封装	331
8.8 器件的封装与熔融拉锥技术	332
8.8.1 光电子器件的封装	332
8.8.2 熔融拉锥的控制系統	333
8.9 光电子器件制造方面的一些建议	335
参考文献	335
<b>第 9 章 现代光学材料工程</b> 方敬忠 刘 红	336
9.1 光学工程科学的基石	336
9.2 材料性能的物理基础	338
9.2.1 材料热膨胀性能的物理基础	338
9.2.2 材料热传导性能的物理基础	339
9.2.3 材料强度的物理基础	340
9.3 反射镜材料	341
9.3.1 大型反射镜材料性能要求	341
9.3.2 大型反射镜材料选择	342
9.3.3 备选镜坯材料及其性能	343
参考文献	352
<b>第 10 章 现代光学测试工程</b> 侯 溪 伍 凡	354
10.1 概述	354
10.1.1 当代最新科学成就与光学测试技术	354
10.1.2 现代光学测试技术的特征	356
10.1.3 现代光学测试技术的应用	356
10.2 单元光学测试技术的发展	358
10.2.1 干涉测试技术	358
10.2.2 表面形貌测试技术	360
10.3 现代光学工程中的光学测试技术	361