

近代光学制造技术

辛金明 主编 辛金明 孙雨南 谢敬群 编著

国防工业出版社

438921

近代光学制造技术

辛企明 主编

辛企明 孙雨南 谢敬辉 编著



国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目(CIP)数据

近代光学制造技术 / 辛企明主编. —北京: 国防工业出版社, 1997. 9

ISBN 7-118-01728-0

I. 近… II. 辛… III. 光学元件-生产工艺 N. TH740.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字(97)第 03970 号

0265/13
国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号)

(邮政编码 100044)

三河腾飞胶印厂印刷

新华书店经售

*

开本 850×1168 1/32 印张 8% 218 千字

1997 年 9 月第 1 版 1997 年 9 月北京第 1 次印刷

印数: 1—3000 册 定价: 17.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

致 读 者

本书由国防科技图书出版基金资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分,又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技事业的发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,国防科工委于1988年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。

国防科技图书出版基金资助的对象是:

1. 学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。

2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技发展具有较大推动作用的专著;密切结合科技现代化和国防现代化需要的高新技术内容的专著。

3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合科技现代化和国防现代化需要的新工艺、新材料内容的科技图书。

4. 填补目前我国科技领域空白的薄弱学科和边缘学科的科技图书。

5. 特别有价值的科技论文集、译著等。

国防科技图书出版基金评审委员会在国防科工委的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由国防工业出版社列选出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承

担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。在改革开放的新形势下,国防科工委率先设立出版基金,扶持出版科技图书,这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版,随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物,是对出版工作的一项改革。因而,评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,这样,才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技工业战线广大科技工作者、专家、教授,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

国防科技图书出版基金

评审委员会

国防科技图书出版基金 第二届评审委员会组成人员

名誉主任委员 怀国模

主任委员 黄 宁

副主任委员 殷鹤龄 高景德 陈芳允
曾 铎

秘 书 长 刘琯德

委 员 尤子平 朱森元 朵英贤

(按姓氏笔划为序) 刘 仁 何庆芝 何国伟

何新贵 宋家树 张汝果

范学虹 胡万忱 柯有安

侯 迁 侯正明 莫梧生

崔尔杰

序 言

现代光学科学技术和当前迅猛发展的光电子技术,在与当代高科技如信息技术、空间技术、核技术、生物技术、材料科技等的相互促进,相互为用的情形下,新的光学设施层出不穷,发挥着革命性的效能,开辟了许多新的应用领域。更为突出的是许多新原理和新器件的出现,标志着光学领域进步的前沿。从实践角度来看,这些成就是与崭新的光学制造技术不可分割的。今天的光学制造技术已远远不止于传统的研磨抛光工艺,而正在形成以新技术武装起来的具有理论与实践基础的学科体系。例如:非球面光学加工,不但用于大型天文望远镜,也用于红外及短波段的反射光学成像系统,以至用于量大面广的光盘光学聚焦透镜;模压技术,适应了规模生产的需要,如电视投影物镜,光盘聚焦透镜以及廉价照相机的物镜等;超光洁表面工艺,不但适应超级光学物镜用于空间观察及微电子曝光系统的需要,而更是对短波光学、精密干涉计量、高质量激光束等具有决定性的意义;全息光学、衍射光学、二元及列阵光学为光学应用提供了传统光学无法实现的新的功能和手段,如全息干涉用于无损探伤和动态测试,全息标志用于商品防伪已形成新兴产业,衍射原理用于激光加工,以及使光学系统轻量化;光刻技术随着大规模集成电路的进展,如今成为工艺的前沿,又成为发展微机械技术的一种基本工艺;光纤技术不但形成了光纤通信工业,而且用作传感器,用于工业测试和医疗诊治;……等等。

今天的光学工作者,对这些新的制造技术,已是不可或缺的基本知识,这说明本书《近代光学制造技术》的出版,作为专业教材,作为专业工作者的参考书和运用手册,是及时的,是切合当代需要的。

本书三位作者常年从事于光学制造技术的教学和科研工作,在理论和实践上都有较高的造诣,而且不时注意着国际发展的现状和动态,他们在现代光学制造的主要方面,在本书中作了丰富翔实的论述,其中有些是本人实践的第一手资料,更为可贵,具见本书有其独到之处。

本书是国内唯一的关于近代光学制造的专著,是对国内光学文库做出的一份有意义的贡献。为此,对本书的出版是值得欢迎的,并愿向读者推荐。

王大珩

1997年4月22日

前 言

随着近代光学和光电子技术的飞速发展,光电仪器,以及构成这些光电仪器的元件发生了深刻而巨大的变化。现在用作光学零件或光电元件的材料已不仅仅是玻璃或晶体,而塑料、金属、陶瓷及半导体等其他材料也已得到了广泛的应用。光学零件的类型已不仅仅是体积较大的、分离的球面透镜或棱镜,而越来越多地采用非球面透镜、微透镜阵列、衍射光学元件和梯度折射率元件等新型光学元件,使零部件小型化、阵列化或集成化。光学零件的相关制造技术也已大大超出了古典的研磨抛光方法,而采用数控加工、精密模压技术及微细加工等近代高新技术。

本书首次对 80 年代以来光学制造最新技术中的主要领域:非球面计算机控制加工技术,非球面光学零件精密模压成型技术,超光滑表面加工技术,衍射光学元件制造技术,梯度折射率光学元件、光波导器件制造技术的科研成果与文献资料进行全面的收集、整理和系统化。不仅仅介绍了国外的高新技术,同时也反映了国内,特别是作者的科研成果。

全书共有六章。第一章、第二章和第三章由辛企明编写,第四章由谢敬辉编写,第五章和第六章由孙雨南编写。全书由辛企明主编。

因作者的学术水平有限,书中的缺点和错误在所难免,诚恳希望读者指正。

作 者

1997 年 1 月

目 录

第一章 非球面光学零件的数控加工技术	1
1.1 概述	1
1.2 数控研磨和抛光技术	3
1.2.1 小型非球面的计算机控制研磨加工	3
1.2.2 非球面的计算机控制抛光	8
1.3 金刚石车削加工技术	26
1.3.1 概述	26
1.3.2 金刚石车削加工工艺	27
1.3.3 典型的加工机床	37
1.3.4 可用金刚石刀具车削的材料	40
1.3.5 非电解镍光学表面的金刚石车削	41
1.3.6 光学塑料的金刚石车削	43
1.4 离子束抛光技术	46
1.4.1 离子束抛光原理	46
1.4.2 工艺因素的影响	48
1.4.3 离子抛光的效果	53
1.4.4 离子抛光机的结构	55
1.4.5 离子抛光非球面零件的工艺过程	57
1.4.6 加工实例	58
参考文献	59
第二章 光学零件精密模压成型技术	61
2.1 光学塑料零件的模压成型技术	61
2.1.1 概述	61
2.1.2 光学塑料的主要物理特性	65

2.1.3 注射成型光学塑料零件的质量	70
2.1.4 光学塑料注射成型的模具	71
2.1.5 注射过程	73
2.1.6 光学塑料零件表面的镀膜	74
2.2 光学玻璃的模压成型技术	75
2.2.1 概述	75
2.2.2 模压成型玻璃零件的质量	77
2.2.3 基本工艺过程	77
2.2.4 压型工艺条件	78
2.2.5 模压成型用的模具	79
2.2.6 模压成型的设备	81
2.3 溶胶—凝胶法玻璃的成型技术	82
2.3.1 用溶胶—凝胶法制造玻璃	82
2.3.2 零件的成型和高温处理	84
参考文献	86
第三章 超光滑表面加工技术	87
3.1 超光滑表面的加工机理	88
3.2 水中抛光	91
3.2.1 特点	91
3.2.2 水中抛光装置	92
3.2.3 抛光工艺	93
3.3 浮法抛光	94
3.4 用微弹性破坏方法进行超精加工	95
3.5 超光滑表面粗糙度的测量	97
3.5.1 接触式测量	97
3.5.2 非接触式测量	98
参考文献	106
第四章 全息工艺技术	107
4.1 引言	107
4.2 干涉全息图的制造工艺	107

4.2.1	全息图的工艺技术条件	107
4.2.2	全息记录装置	109
4.2.3	全息记录材料	111
4.2.4	全息图的记录方法	112
4.2.5	白光全息图	118
4.2.6	全息透镜的制造及像差校正	127
4.3	全息图和全息光栅的模压生产技术	136
4.3.1	全息图和全息光栅的复制技术综述	136
4.3.2	浮雕全息图的记录	139
4.3.3	螺旋光栅装饰材料的原版制造工艺	140
4.3.4	金属模板的电铸工艺	144
4.3.5	模压技术	151
4.4	计算机全息图和二元光学元件制造技术	153
4.4.1	概述	153
4.4.2	计算机全息图的制作和再现过程	153
4.4.3	用迂回位相法编码的计算机全息图	156
4.4.4	计算机全息干涉图	159
4.4.5	二元光学元件	160
参考文献		169
第五章 梯度折射率光学元件		170
5.1	概述	170
5.1.1	发展简史	170
5.1.2	梯度折射率(GRIN)的表述	171
5.1.3	梯度折射率的类型和应用	171
5.2	离子交换原理	175
5.2.1	离子交换与玻璃结构	175
5.2.2	离子交换反应	176
5.2.3	扩散方程及其解	179
5.3	GRIN 玻璃及其折射率计算	184
5.3.1	GRIN 玻璃	184

5.3.2 折射率与浓度关系	186
5.3.3 离子交换对	191
5.4 GRIN 棒透镜	194
5.4.1 工艺流程	194
5.4.2 离子交换时间的确定	197
5.4.3 折射率分布控制	198
5.5 GRIN 微透镜阵列	204
5.5.1 有掩模无外场条件下扩散方程及其解	205
5.5.2 有掩模电场辅助离子交换扩散方程及其解	207
5.5.3 电场辅助离子交换制作平面微透镜阵列	210
5.6 用溶胶—凝胶法制造 GRIN 材料	213
5.6.1 溶胶—凝胶法的优缺点	213
5.6.2 制作工艺	214
5.6.3 现有样品的玻璃成分和特性	216
5.7 用共聚法制造高分子 GRIN 材料	218
5.7.1 高分子材料及其性能	218
5.7.2 扩散共聚法	218
5.7.3 悬浮共聚法	221
参考文献	222
第六章 光波导器件制作	225
6.1 光波导概述	225
6.2 图形的生成与转移	227
6.2.1 电子束扫描制作光刻掩模板	227
6.2.2 光刻	229
6.2.3 光栅制作	229
6.3 薄膜沉积技术	231
6.3.1 真空蒸发镀膜	232
6.3.2 离子镀膜	232
6.3.3 离子溅射镀膜	233
6.4 刻蚀技术	234

6.4.1 湿法化学刻蚀	234
6.4.2 离子束溅射刻蚀	237
6.4.3 几种干法刻蚀技术比较	240
6.5 表面改性技术	244
6.5.1 扩散	244
6.5.2 质子交换	252
6.5.3 离子交换	254
参考文献	258

第一章 非球面光学零件的 数控加工技术

1.1 概 述

非球面光学零件就是由一个或两个与球面(包括平面)有差异的光学表面构成的光学零件。在这些非球面中最常见的是有一个对称轴的回转非球面。

对于回转非球面,可以用下面的普遍式表示:

$$x = \frac{CH^2}{1 + \sqrt{1 - KC^2H^2}} + \sum_{i=2}^n a_{2i} H^{2i} \quad (1-1)$$

式中, x 为非球面的 X 轴(对称轴)方向的坐标,坐标原点为非球面顶点; $C=1/r_0$, r_0 为非球面顶点的曲率半径; $H=\sqrt{y^2+z^2}$; $K=1-e^2$, e 为偏心率; a_{2i} 为非球面系数。

在回转非球面中又以二次回转非球面的应用最为广泛。二次非球面的子午面方程为

$$x = \frac{Cy^2}{1 + \sqrt{1 - KC^2y^2}} \quad (1-2)$$

通过变换,我们可以把上式写成

$$y^2 = 2r_0x - (1 - e^2)x^2 \quad (1-3)$$

或写成

$$x = \frac{r_0 - \sqrt{r_0^2 - (1 - e^2)y^2}}{1 - e^2} \quad (1-4)$$

我们可以找到一个球面,使它和二次非球面的偏离量最小,我

们称这个球面是最接近的比较球面。非球面与最接近比较球面在不同口径处的偏离量称为非球面度。

最接近比较球面的曲率半径可以用下式求得：

$$\frac{1}{r} = \frac{1}{r_0} - \frac{e^2 h^2}{4r_0^3} \quad (1-5)$$

式中, r 为最接近比较球面的曲率半径; r_0 为非球面顶点的曲率半径; h 为非球面光学零件最大口径的一半。

非球面度的计算式为

$$t = \frac{e^2 y^2}{8r_0^3} (h^2 - y^2) \quad (1-6)$$

用它可以计算不同 y 值时的非球面度 t 。

最大的非球面度 $t_{\max}$, 为

$$t_{\max} = \frac{e^2 h^4}{32r_0^3} = \frac{e^2 A^3 D}{4096} \quad (1-7)$$

式中, $A = D/F$, D 为零件的最大口径, F 为焦距。

众所周知, 在光学系统中采用非球面光学零件有改善像质、简化系统、减小系统的外形尺寸和减少重量等优点。但是, 由于非球面表面的加工和检测要比球面零件困难得多, 所以阻碍了非球面光学零件的广泛应用。

非球面表面加工和检测比较困难的主要原因是：

(1) 大多数非球面只有一根对称轴, 而球面则有无数对称轴。所以非球面不能采用球面加工时的对研方法加工。

(2) 非球面各点的曲率半径不同, 而球面则是各点都相同, 所以非球面面形不易修正。

(3) 非球表面对该零件另一面(平面或球面)的偏斜无法用球面透镜时所使用的定中心磨边的方法来解决。

(4) 非球面一般不能用光学样板来检验光圈和局部光圈, 所以检验方法复杂而费时。

目前我国大多数非球面光学零件是用研磨抛光的方法制造的, 而且是依赖技术很高的技术工人通过反复地局部地修抛和不

断地检测而完成的。不仅加工周期长,而且重复精度不高。

近二十多年来研究和发展的许多新的非球面加工技术。在此介绍应用较广泛的计算机数控研磨和抛光技术,金刚石车削加工技术,离子束抛光技术。

1.2 数控研磨和抛光技术

60年代以来,随着计算机技术的发展,光学非球面的数控研磨和抛光方法得到了研究和发展。

通常,数控加工系统有开环控制和闭环控制两种类型。

开环控制是由计算机控制刀具的坐标位置和驻留时间;闭环控制是具有反馈的加工方法,它利用仪器测量得到的信息来调整和控制整个加工过程。

为了使控制过程朝着要求的面形逐渐收敛,校正误差的方法必须能使面形的修改产生预期的变化。显然,如果每一次面形的修改后表面误差能逐渐减小的话,表面就一定会收敛于要求的面形。

这种方法的加工精度主要取决于测量的精度和所采用的误差校正方法。机床精度对加工的影响不会成为非常主要的因素。

研究和开发这种加工方法的目的在于不需完全依赖熟练的加工技能而加工出精度高,价格较低的非球面光学表面。

对于直径较小或非球面度很大的非球面零件,一般先用计算机控制的精密磨床将零件表面磨削成所要求的面形,再用柔性的抛光模将此表面抛光。对于直径较大,非球面度不大的精密非球面透镜或反射镜,则先用通常的研磨抛光方法将其表面加工成最接近的球面,然后用计算机控制的抛光机床将此表面修改成所要求的非球面。

1.2.1 小型非球面的计算机控制研磨加工

一、加工步骤

非球面的研磨成型过程大体上可以分为以下几个步骤:

(1)采用标准尺寸的毛坯(压型毛坯或是经过适当预加工的毛