

468921

# 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

*0265/12*  
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 刘瑄德

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,已是不可成缺的基本知识,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流程	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
	<b>第三章 超光滑表面加工技术</b> .....	<b>87</b>
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
	<b>第四章 全息工艺技术</b> .....	<b>107</b>
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	螺纹光栅装饰材料原版制造工艺	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:

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

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; $a_i$  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的。

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



坏),将其加工余量按坐标位置输入计算机。

(2)计算机将此数据变成控制信号输入机床的传动系统,控制机床主轴和工具之间的相对位置和运动速度,从而加工出第一个非球面表面。

(3)将研磨成型的非球面表面用柔性抛光模抛光。

(4)将抛光好的零件重新装夹在机床的主轴上,同时卸下刀具轴上的磨具,换上传感测量头。用原来的控制信号控制零件和测量头作相对运动,测出抛光零件的面形。

(5)把面形测量的数据输入计算机,与原数据进行比较得到新的控制程序。

(6)用修改后的控制程序加工出第二个非球面表面,然后用柔性抛光模抛光。

(7)根据零件的精度要求,上述(4)、(5)、(6)这三个步骤要重复进行多次,直到获得合格的零件为止。

## 二、典型机床

最典型的数控非球面研磨机床是德国 Zeiss 厂设计制造的非球面加工机床,它的原理如图 1-1 所示<sup>[1.1]</sup>。该机床的运动控制是

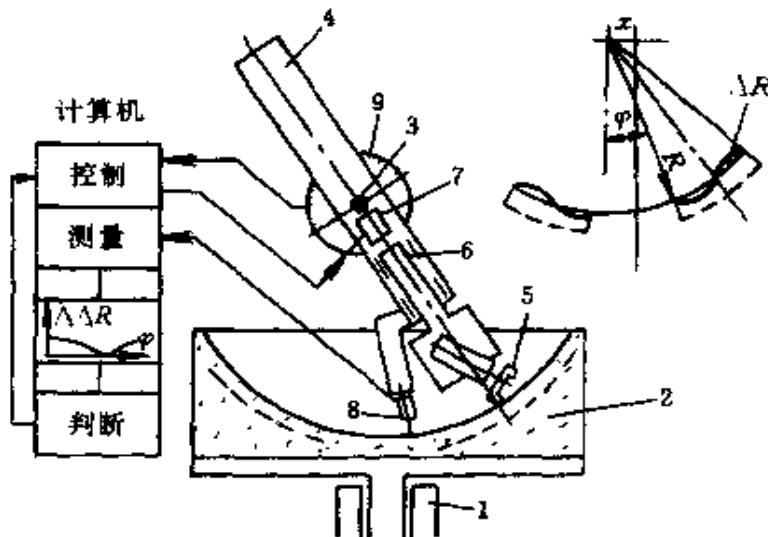


图 1-1 Zeiss 非球面机床的原理

1—工件轴;2—工件;3—枢轴(极坐标原点);4—摆动臂;5—刀具;  
6—滑轨;7— $\Delta R$  和驱动系统;8—测头;9—摆动( $\varphi$ )的轴位置数字读出器。

采用了极坐标系统。采用极坐标的主要原因是：

(1)制造高精度的枢轴要比高精度的直线导轨容易。

(2)如果在旋转时,运动部件的重心位于转轴上,那么在旋转时就不会有质量的偏移,就避免了机床的变形。

(3)可以将工具的行程达到最小,这可以减小计算机所需的存储量,也可以减少用插入程序以及判定独立坐标系统的轴位置数字读出器所需的费用。

(4)极坐标的控制速度最小,有利于控制机床运动的电子系统的设计。

(5)有利于用测头对加工表面进行测量。

该机床有一个特殊的优点:它可以将加工机床和测量装置组合在一起。装在转轴上的感应机械测头能在加工后立即测出非球面表面的轮廓。因此,很容易得到所需的校正函数,并能补偿如刀具磨损、机床刚性或热漂移等因素所产生的误差。

工件轴和确定坐标原点的枢轴采用液压静力轴承。刀具的移动也是采用液压静力导轨。因此机床的运动具有优良的径向和轴向精度,机床刚度也很好。

采用一个闭合反馈电路来控制刀具的径向运动。由计算机通过12位二进制的数模变换器来控制电压。实际电压是由一个和滑轨接触的感应式测头来提供。这两个电压在电桥中进行比较,电桥电压经放大后输入一个小直流电机,此电机通过高精度齿轮移动滑轨和刀具。在切削力不变时,其位置精度可达 $0.02\mu\text{m}$ 。

加工时,摆动速度和旋转速度从工件的周边到中心是同步增加的。同步运动是这样实现的:在枢轴上的轴位置数字读出器9给计算机一个脉冲,从而产生对直流电机的旋转运动的控制信号。另一个在工件轴上的轴位置数字读出器控制了驱动摆臂的步进电机。因此在工件表面形成了一个不变的切削螺旋线。

传感机械测头8,用来测量所加工的非球面,它安装在摆动臂上。在摆动时它和表面接触。测头的电压就成了摆角的函数。将它和储存在计算机中的标定函数相比较,得到偏差值,这个偏差可

在记录仪上画出。将偏离函数转换成校正函数,以便在下一个研磨循环中用它来消除偏差。

这种机床可以用来研磨非球面度较大的轴对称非球面,加工印迹也较小。

### 三、非球面透镜的后续抛光

用上述非球面研磨机床研磨后的非球面零件要进行抛光加工。

抛光时一般使用柔性抛光模,这种抛光模在沿着被加工表面移动时能改变自己的表面形状使其和加工表面保持吻合状态。这种抛光方法一般并不能用来改善加工表面的面形,而只不过是用来改善表面的粗糙程度。

图 1-2 所示是一种抛光精度较高的非球面表面时用的气压柔性抛光模<sup>[1,2]</sup>。将抛光模层材料用铁箍固定在空心的金属基体上。抛光时,通进压缩空气,使抛光模层材料和被抛光零件均匀而全面的吻合,并保持均匀的压力。抛光模层可以是覆盖有柔软的薄沥青

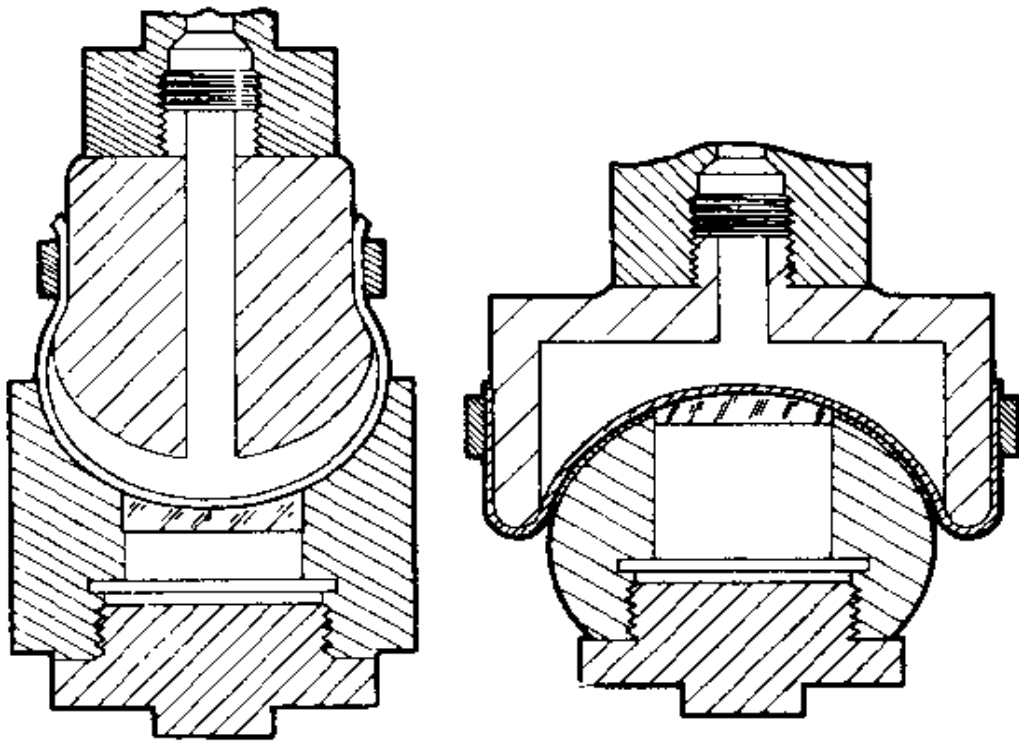


图 1-2 非球面透镜的气压抛光模

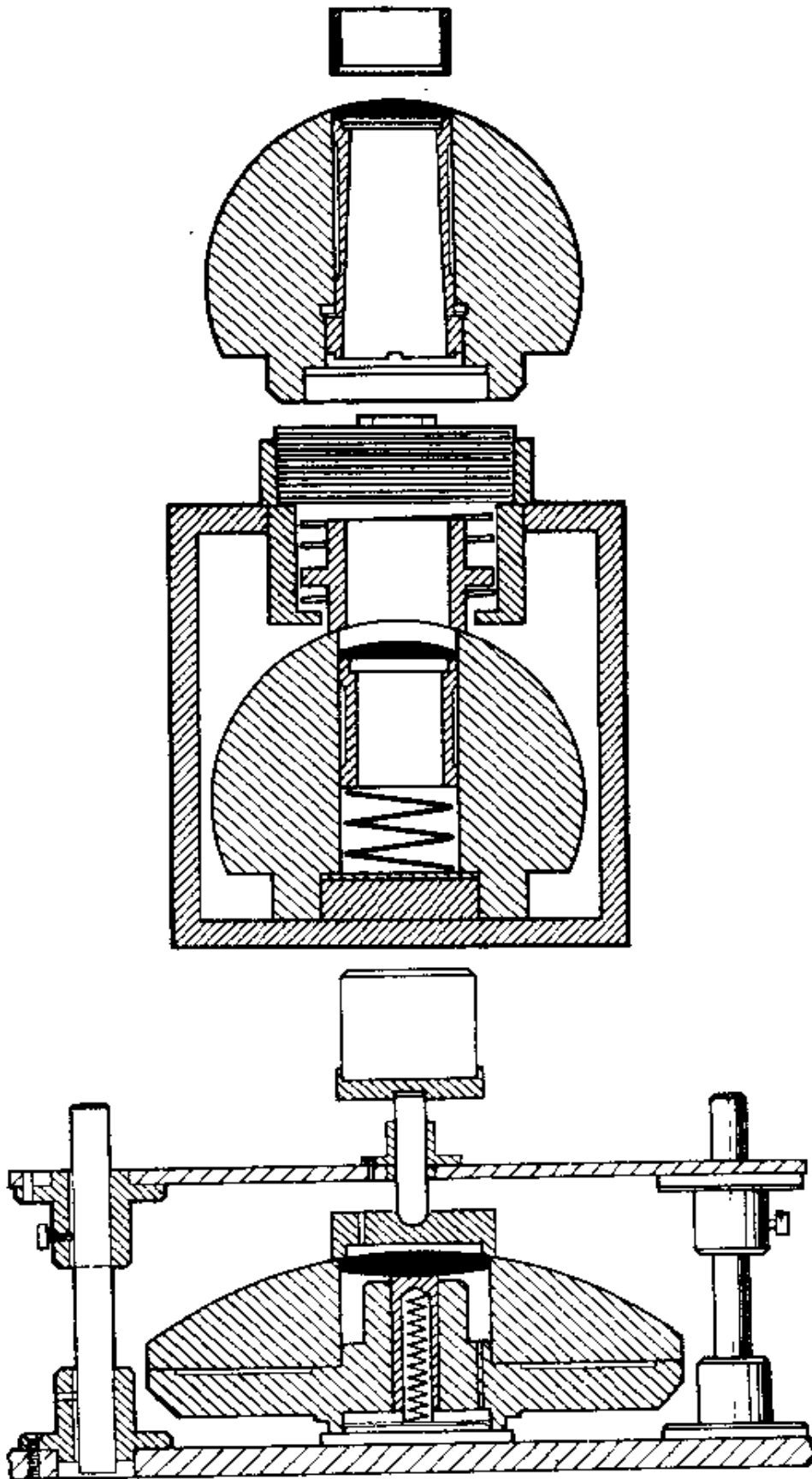


图 1-3 非球面透镜的夹具

层的尼龙膜片,也可以是胶有许多浸有柏油抛光胶的小毛毡块的无孔耐油橡皮。

用此方法抛光时,非球面透镜一定要正确地装夹在夹具中,否则会降低非球面的面形精度。图 1-3 和图 1-4 所示的方法是将非球面透镜放入具有与此非球面最接近球面的承座内,使其得到正确的定位<sup>[1,2]</sup>。

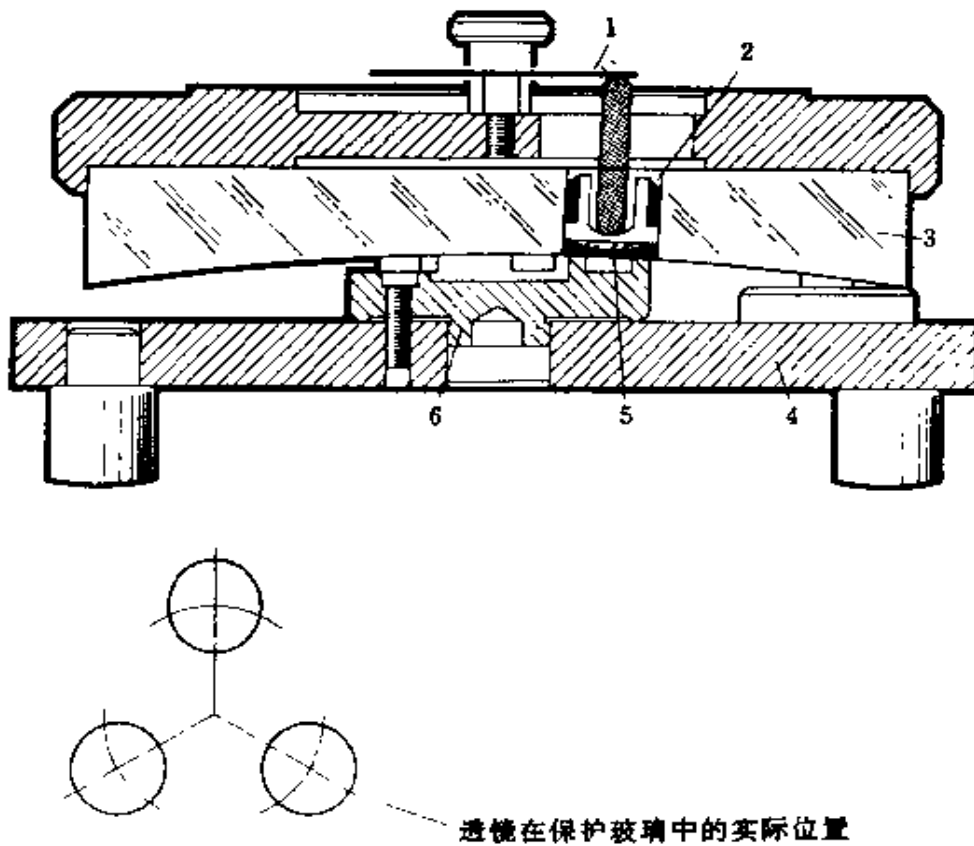


图 1-4 非球面的成盘装夹

1—加压弹簧;2—沥青;3—玻璃辅助块;4—调整夹具;  
5—被抛光零件;6—上盘时专用的环形圈。

### 1.2.2 非球面的计算机控制抛光

非球面度较小的大、中型光学非球面零件一般可以用计算机控制抛光的方法加工。

## 一、基本原理

图 1-5 是计算机控制抛光的原理方框图<sup>[1.3]</sup>。

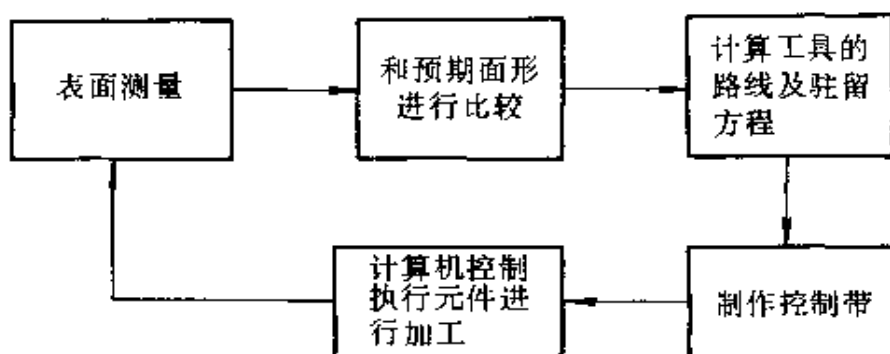


图 1-5 计算机控制抛光的方框图

这种方法是用一个尺寸比被加工零件小得多的抛光模，在计算机的控制下，以一定的路线、速度和压力抛光工件表面。用改变任何一个区域的抛光时间或压力，可以精确地获得要求的材料去除量。由于抛光的去除量不大，所以工件先要用通常的方法研磨、抛光成最接近的比较球面。计算机控制抛光仅仅是抛去球面和要求的非球面在各点处所存在的偏离量。在加工中，使用迭代的方式使表面误差逐步收敛。

我们知道，抛光是一个复杂的，有许多因素决定的加工过程。所以一般很难找到表面去除量和那些描述抛光模、抛光材料以及抛光模运动等参数之间的正确的数学关系。然而，如果我们做一些假设的话，抛光过程可以描述成一个线性的，不随抛光模位置的变化而变化的过程。

### (一) 普列斯顿(Preston)假设

1927年普列斯顿指出，在很大的数值范围内，抛光可以描述成一个线性方程

$$\frac{dz}{dt} = K'VP \quad (1-8)$$

式中， $K'$ 为比例常数，它由除速度和压力以外的其他因素所决定；

$V$ 为表面某一点 $(x, y)$ 和瞬时 $(t)$ 的抛光速度， $V = V(x, y, t)$ ；

$P$  为该点  $(x, y)$  和瞬间  $(t)$  时的压力,  $P = P(x, y, t)$ 。

因此, 当我们知道了某一点的速度和压力, 以及作用的时间  $(t)$ , 就可以计算出表面材料的去除量  $\Delta z$

$$\Delta z(x, y) = K' \int_0^t V(x, y, t) P(x, y, t) dt \quad (1-9)$$

$$\Delta z(x, y) = z_0(x, y) - z(x, y) \quad (1-10)$$

式中:  $z_0(x, y)$  是时间  $t=0$  时的表面高度,  $z(x, y)$  是时间为  $t$  时的表面高度。

## (二) 用数学算子表示去除原理<sup>[1,4]</sup>

虽然可以用式(1-9)逐点地对整个表面进行计算, 但一般来说是很难完成的, 而且对计算机控制来说也过于复杂。下面我们作一些为了简化计算的假设, 并指出如何用线性数学算子来表示去除过程。这样虽然会给抛光方法带来某些限制, 但它却能大大简化预计材料去除量分布时所需要的计算。

首先, 假设表面材料的去除仅仅是由于在表面上运动的抛光模的抛光作用所致。因此不必知道材料是如何被去除的机理, 而仅仅需要知道单位时间内停留在某一区域的抛光模所去除的材料数量。

其次, 假设抛光时材料的去除量只与抛光模自身的运动方式有关, 而与抛光模工件表面上移动无关, 也就是说, 对实际运动着的抛光模来说, 抛光模的转动速度比起抛光模在工件表面上移动的速度要大得多。

最后, 假设抛光模在整个工件表面上的抛光速率保持不变。对于通常的抛光模来说, 这意味着抛光模是完全柔性的, 以保证当工件表面面形变化时, 抛光模在工件表面上每点都施加相同的压力。一般来说, 这一点是做不到的。但在去除速率很低以及抛光模不露边的情况下, 可以认为这个假设是近似正确的。

为了描述线性成型方法的性质, 我们用数学算子来模拟实际的系统。通过这个算子能够将一个表示抛光模运动的输入量变换

成一个表示材料去除量的输出量。由于进行了上述的几个假设,这个算子应该是线性的,不随位置而变化的。我们称这种系统为“LSI”系统(Linear and Shift Invariant System)。

我们取输入函数为抛光模在工件表面任意一个给定区域内所停留的时间。我们称这个函数为驻留函数,并将它归一化。因此有

$$T = \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} D(x, y) dx dy \quad (1-11)$$

式中,  $T$  是总的抛光时间;

$D(x, y)$  为驻留函数。

下面我们推导输入函数和输出函数之间的关系,找出去除算子。

抛光系统的脉冲响应称为去除函数,它是由该系统对  $\delta$  函数的响应给定。

$$R(x, y) = \Omega[\delta(x, y)] \quad (1-12)$$

式中,  $R(x, y)$  为系统的去除函数;  $\delta(x, y)$  此时为驻留函数。

实际上,我们让去除函数定义为一个不作移动的抛光模在单位时间内材料去除的平均量,所以

$$R(x, y) \equiv \lim_{T \rightarrow \infty} \left( \frac{1}{T} \int_0^T \Delta z_r(x, y, t) dt \right) \quad (1-13)$$

式中,  $R(x, y)$  为去除函数;

$\Delta z_r(x, y, t)$  为不移动抛光模去除材料的量,它是抛光模坐标和时间的函数。如果  $\Delta z_r(x, y, t)$  是周期函数,那末去除函数由一个周期内去除量的平均值给定,此时  $T$  就变成抛光模运动的周期。

至此,我们可以看出,如果在工件表面上移动去除函数,然后将工件表面上每一个区域处所去除的材料进行叠加,就可以找出工件表面各区的去除量。首先将去除函数和驻留函数分到尺度为  $\delta\alpha$  和  $\delta\beta$  的面积元中,再利用去除算子的 LSI 特点,在工件表面上移动去除函数和将任一位置处的去除量加起来。因此有



$$\Delta z(x, y) = \sum_a \sum_\beta [R(x-a, y-\beta)D(a, \beta)]\delta a\delta\beta \quad (1-14)$$

式中,  $R(x, y)$  为去除函数;

$D(x, y)$  为驻留函数。

如果将面积元  $\delta a\delta\beta$  减小成微分表面面积元  $dad\beta$ , 则

$$\begin{aligned} \Delta z(x, y) &= \lim_{\substack{a \rightarrow 0 \\ \beta \rightarrow 0}} \sum_a \sum_\beta [R(x-a, y-\beta)D(a, \beta)]\delta a\delta\beta = \\ &\int_a \int_\beta [R(x-a, y-\beta)D(a, \beta)]dad\beta \end{aligned} \quad (1-15)$$

这就是两度空间的卷积。因此, 可以将上式写成

$$\Delta z(x, y) = R(x, y) * * D(x, y) \quad (1-16)$$

由此可知, 去除算子是驻留函数与去除函数的卷积。这是一种可以根据普列斯顿表达式对工件表面各点的去除量进行直接计算的方法。

以上我们假设表面面形的修改仅仅是由控制去除函数在任一给定面积上的时间多少来实现, 也就是说, 抛光模的压力是不变的。如果面形的修改还与抛光模在工件表面不同位置处的压力有关, 那末上述方程应写成

$$\Delta z(x, y) = R(x, y) * * D(x, y)P_c(x, y) \quad (1-17)$$

其中  $P_c(x, y)$  是抛光模作用在工件表面位置为  $(x, y)$  处的压力。将  $P_c(x, y)$  归一化, 所以

$$F(x, y) = \int_0^\infty \int_0^\infty P_c(x, y) dx dy + F_0 \quad (1-18)$$

式中,  $F(x, y)$  为表面上  $(x, y)$  处抛光模的压力;  $F_0$  为常量。

必须指出,  $P_c(x, y)$  和上述普列斯顿表达式中的  $P(x, y)$  是不同的。一般来说, 任意一点的压力由很多因素所决定, 如表面的形状, 抛光模在加工时的压缩变形, 加在抛光模上的外力等等。因此, 一般情况下, 压力并不完全决定于抛光模的位置。为了保持去除算子能够不随位置而变化, 我们必须假设这些由于抛光模层和表面

特性而引起的压力变化是很小的,以便使  $P_c(x, y)$  仅仅决定于抛光模的位置。

### (三) 去除函数 $R(x, y)$ 的特性<sup>[1, 4]</sup>

因为我们仅仅考虑成型过程是去除材料的过程,因此必须限定去除函数值是单向的实数(应该小于或等于零)。

根据中央切片定理,可以找到两个重要的特性。

一维的傅里叶变换形式为

$$g(x) = \int_{-\infty}^{\infty} G(\beta) e^{i2\pi\beta x} d\beta \quad (1-19)$$

$$G(\xi) = \int_{-\infty}^{\infty} g(\alpha) e^{-i2\pi\alpha\xi} d\alpha \quad (1-20)$$

因此

$$\tilde{R}(0, 0) = \int_{-\infty}^{\infty} R(x, y) dx dy \quad (1-21)$$

$$R(0, 0) = \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{R}(\xi, \eta) d\xi d\eta \quad (1-22)$$

第一个表达式表明系统的直流响应是由去除函数在整个空间积分而得。由于去除函数的单向性,去除函数在整个空间内的积分值永远为非零值。也就是说,系统的直流响应是非零值。这是非常明显的,因为只要在整个表面进行均匀地抛光,就能得到均匀的去除量。

第二个表达式说明,如果有一个中心去除量为零的去除函数的话,那末传递函数的积分值也必然是零。这就暗示,尽管这种形式的去除函数也能校正一定的空间频率误差,但它必然会引起其他的问题。例如中心为零的去除函数比中心不为零的去除函数更容易增加加工表面的高频误差。这个特性非常重要,因为很多做简单回转运动的抛光模都产生这种类型的去除函数。

实验也表明用中心去除量为零的抛光模虽然在一开始也能减小表面误差,但减小到一定程度后,再用它抛光就会增大表面面形误差。这是因为刚开始抛光时,振幅大频率低的误差要比高频误差减小得快,到最后仅仅剩下高频误差。由于随着抛光次数的增加,

很多高频误差的振幅也增大,所以整个面形误差也随抛光时间而增大。相反地,如果用中心去除量最大的抛光模抛光,面形误差能随抛光次数的增加而单调地减小。

当然可以用不同的运动机构使抛光模产生很多种不同的、中心去除量最大的去除函数,但最好是采用如高斯函数那样的平滑的去除函数。

#### (四)驻留函数 $D(x, y)$

在实际的加工中,先是用仪器测量工件表面得到工件的实际面形,将它与理想的面形比较后得到表面面形的误差。也就是说,去除材料量  $\Delta z(x, y)$  是已知的。当抛光模的运动方式决定后,去除函数也是已知的,所以问题就变成求解实现给定去除量时的驻留函数,也就是变成将被去除材料量与去除函数进行反卷积运算(或称傅里叶变换)的过程。

如果

$$\Delta z(x, y) = D'(x, y) * * R(x, y)$$

就有

$$D'(x, y) = \Delta z(x, y) (* *) R(x, y) \quad (1-23)$$

式中,  $D'(x, y) = D(x, y)P_c(x, y)$ , 是驻留函数的普遍式。

虽然傅里叶变换提供了求驻留函数的直接方法,但驻留函数也可以在空间域内计算。有很多方法可以进行这类计算,这里仅介绍两种对光学加工最有用的方法。

##### 1. 按比例估算法

这种方法把驻留函数简单地认为与表面误差成正比,就好像工人手工修抛时从较高的各点往下抛的做法一样。

图 1-6 给出了一个如何进行这种估算的例子。这时,驻留函数在一维空间内具有三角形的轮廓,它与表面误差,也就是材料去除量分布成正比。用去除函数和该驻留函数进行卷积,计算出材料的实际去除量。我们简单地把材料的最大去除量和表面误差的峰值相一致。计算最大去除量时的比例因子由抛光模的抛速率和总加工时间来确定。从原来的面形减去所去除的材料量就得到加工后的面形,这个结果通常用正值表示,以表明哪些地方还必须进一

步校正其面形。图中给出了两次抛光中减小中心区域面形误差的情形。

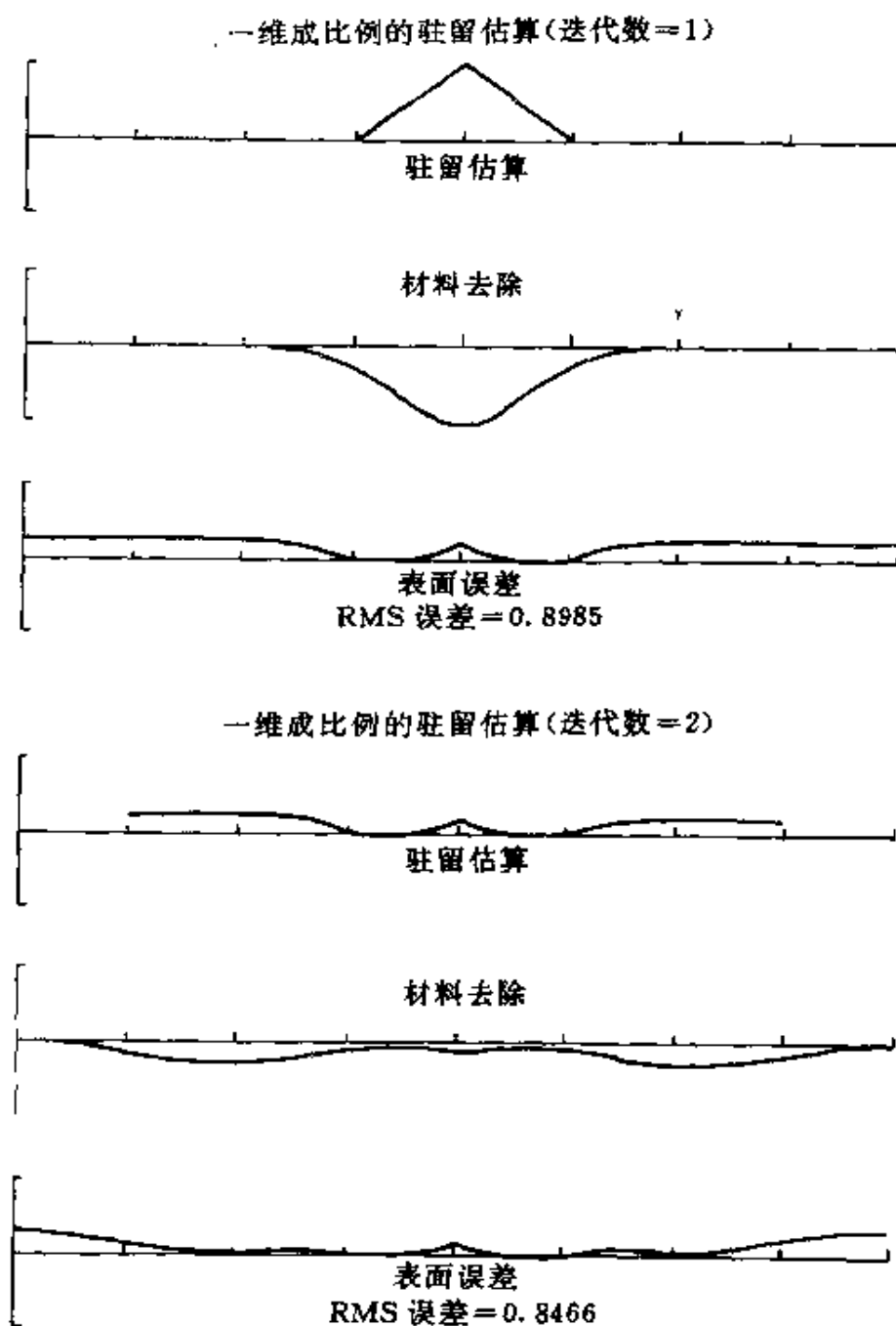


图 1-6 将驻留函数估计成与表面误差成比例时，  
成型过程的一维模型

该方法最主要的优点是在求驻留函数时,实际上不需要进行计算,其缺点是误差校正的速度不快。

## 2. 简森—范锡图特(Jansson—Van Cittert)法

这种方法的算法是:

- (0)  $K=0, D^{(0)} = \lambda \Delta z_0$
- (1)  $\Delta z^{(K)} = (D^{(K)} * * R) n^K$
- (2)  $D^{(K+1)} = D^{(K)} + r^{(K)} (\Delta z_0 + \Delta z^{(K)})$
- (3)  $K \rightarrow K+1$
- (4) 转至步骤(1)

式中,  $r^{(K)} = c[1 - 2(B-A)^{-1} |D^{(K)} - 2^{-1}(A+B)|]$ ;

$A$  为  $D'(x, y)$  的下限;

$B$  为  $D'(x, y)$  的上限,  $A \leq D'(x, y) \leq B$ ;

$c$  为归一化常数;

$n^K$  为第  $K$  次归一化常数。

由于随着迭代次数的增加,驻留函数的形状会越来越尖,以致最后只局限在某两个数值之间。而每次去除的材料  $\Delta z^{(K)}$  是由驻留函数的形状(或面积)与去除函数决定的。 $n^K$  的设定就是为了使去除量能与实际相符。

实际上,为了使面形误差最小,这些工作都是用归一化后的数据来进行的。设归一的表面面形的最小值为零,最大值为 256。若用下标“ $n$ ”来表示归一化后的数据,则

$$\Delta z_{0n}(i, j) = 256R_0[\Delta z_0(i, j) - \Delta z_{0\min}]$$

$$R_n(i, j) = 256R_0[R(i, j) - R_{\min}]$$

式中

$$z_0 = \frac{1}{\Delta z_{0\max} - \Delta z_{0\min}}$$

$$R_0 = \frac{1}{R_{\max} - R_{\min}}$$

$\Delta z_{0\max}$  和  $\Delta z_{0\min}$  分别为表面误差函数  $\Delta z_0$  的最大值和最小值;  $R_{\max}$  和  $R_{\min}$  分别为去除函数  $R$  的最大值和最小值。

第  $K$  次迭代后的面形误差可以用下面的方法求得：

$$E_K = E_{K-1} + C_0 \Delta z^{(K)} = E_{K-1} + C_0 (D^{(K)} * * R) =$$

$$E_{K-1} + \left[ \frac{C_0 D_0}{256} \right] \left[ \frac{R_0}{256} \right] (D_n^{(K)} * * R_n) \quad (1-24)$$

其中,  $D_n^{(K)}$  是第  $K$  次迭代后归一化产生的驻留函数;  $D_0$  为未知的归一化常数, 用来估算驻留函数;  $R_n$  为归一化后的去除函数;  $R_0$  为去除函数的归一化常数。  $C_0$  为驻留函数归一化时选用的常数, 如果用峰—峰归一时, 为了使驻留函数的归一与峰值相匹配, 需使

$$C_0 = \frac{-E_{K-1}(x_0, y_0)}{\Delta z_K(x_0, y_0)} \quad (1-25)$$

式中,  $x_0, y_0$  是峰值的坐标。

因为上式中  $D_0$  为未知数, 可将  $C_0, D_0$  和 256 组合成一个新的常数  $C_1$ 。即令  $C_1 = C_0 D_0 / 256$ , 则有

$$E_K = E_{K-1} + C_1 \left[ \frac{R_0}{256} \right] (\Delta z_n^{(K)}) \quad (1-26)$$

$\Delta z_n^{(K)} = D_n^{(K)} * * R_n$ , 它是第  $K$  次迭代产生的驻留函数与去除函数的卷积。

如果采用使均方根误差(RMS)最小的方法求得  $C_1 R_0$  时, 有

$$C_1 = \left( \frac{256}{R_0} \right) \left[ \frac{(E_{K-1})(\Delta z_n^{(K)}) - (E_{K-1} \cdot \Delta z_n^{(K)})}{(\Delta z_n^{(K)})^2 - (\Delta z_n^{(K)})^2} \right] \quad (1-27)$$

因而, 重新估算的驻留函数为

$$D^{(K)} = C_1 D_n^{(K)} \quad (1-28)$$

采用这种方法来计算驻留函数是很方便的, 而且有很好的效果。

## 二、加工设备的基本组成部分

### (一) 抛光机床

使用微机实现非球面抛光的闭环控制加工机床, 一般来说应具备下述功能:

(1) 能用高精度的测试仪器对加工工件的表面面形进行实时检测;

(2)用计算机处理分析检测数据,形成抛光模运动的各种参数;

(3)在计算机控制下,使抛光模执行预定的运动程序。

可以选择多种方案来实现上述功能。这里介绍一种方案,这种方案包括用干涉仪对工件表面进行实时检测;用个人电脑(一般为386)对检测数据进行处理、分析,产生抛光所需的驻留函数和抛光模的移动路线;用Z80单板机控制抛光模运动的路线,确定抛光模在工件上的位置,以及控制抛光模在工件表面垂直方向上的位移。下面做具体的说明。

### 1. 机床结构设计

工件和抛光模的相对运动可以有两种设计形式:第一种是工件不动,抛光模在工件表面沿着 $x, y$ 两方向作直角坐标数控运动;第二种是工件旋转,抛光模沿 $x$ 方向直线移动,组成极坐标数控运动方式。

为了减小摩擦、消除间隙和爬行以及提高丝杠传动的精度,采用滚珠丝杠传动和滚动导轨导向。

为了减小由于机械空回产生的窜动,步进电机要采用电力阻尼。通过波形变换使输入步进电机的是矩形脉冲,这样能量在电机的两个电极之间是逐渐变化的,从而使系统的运动更加平稳。

在丝杠的两端应装有限位开关,一旦由于电器故障而产生电机失控时关闭系统以防止机床的损坏。

由于相移式干涉仪的测量精度很高,因此主床身的刚性和防震性是非常重要的。

### 2. 抛光模运动的设计<sup>[1, 4]</sup>

抛光模层可采用光学零件抛光时常用的柏油或聚氨酯等材料。它的轮廓应该和被加工表面尽可能的吻合。

抛光模运动的设计要考虑两个问题。首先要求去除函数的图形是中心有峰值的平滑曲线;其次是抛光模运动的机构应简单而容易制造。

要得到中心有峰值的去除函数,在设计抛光模的运动时就必

须使中心部分具有较大的速度和较长的抛光时间。这可以用一个既有快速自转又有慢速公转的抛光模来实现。只要改变角速度的比值、抛光模直径与两转动中心间距的比值,就可以得到很多个类似的去函数。

### (二)实时干涉测量原理

实时干涉测量非球面面形的原理如图 1-7 所示<sup>[1-5]</sup>。

用台曼激光不等光程干涉仪使被测非球面的反射波面与参考波面产生干涉。CCD 摄像机的探测面安放在被测系统出射光瞳的像平面处,CCD 探测到的干涉条纹信号输入计算机中。

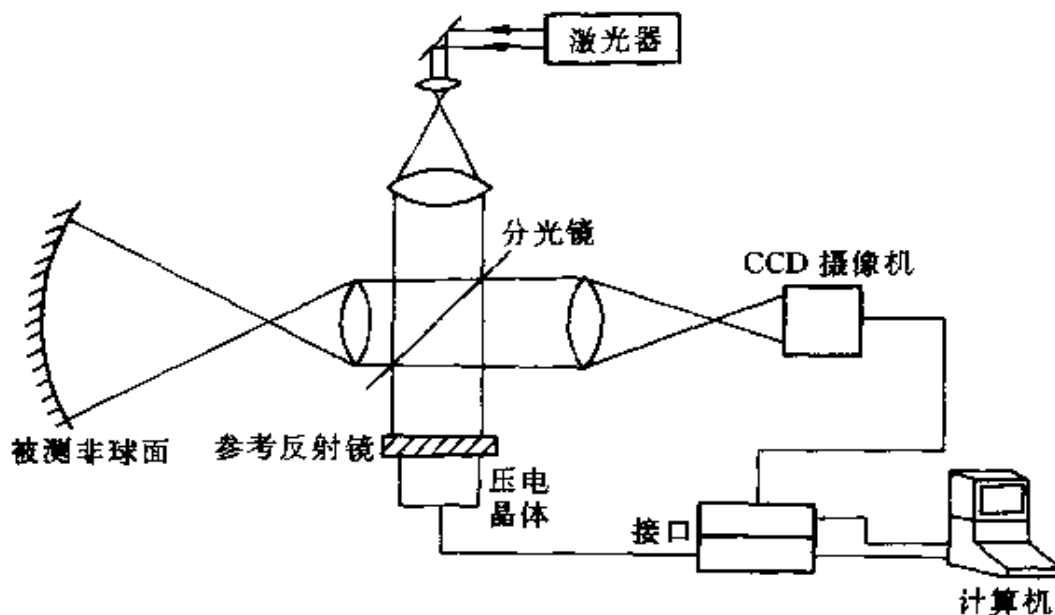


图 1-7 干涉测量原理示意图

不管是 CCD 还是光电二极管面阵,它们有两个重要特性。首先,因为在光照过程中所产生的电荷是积累和存储的,所以它们是积分探测器;另一个特性是每个探测单元的位置精度非常高,因此可以消除一般电视摄像机所存在的畸变。

### (三)控制系统

光学非球面加工用的计算机控制系统可以由主机(一般可以用 IBM PC 机)与直接控制机(如 Z80 单板机)两级机组成的分布式控制系统。主机主要完成非球面面形误差的分析计算,计算并



产生驻留函数及运动轨迹;而直接控制机则通过控制装置控制 PZT 进行位相测量,以及控制抛光机床带动抛光模按要求的运动对表面进行抛光。

控制软件可以分成两大系统:硬件控制软件和反馈控制软件。

### 1. 硬件控制软件

硬件控制软件主要包括干涉仪系统的标定、检波器测量结果的输出、数据的显示和分析以及工作台运动的控制所需的软件。

(1)为了要对干涉仪系统中 PZT 的移动进行标定,并消除 PZT 的非线性误差,计算机软件要实现以下功能:将 500 个点的线性跳跃加到 PZT 控制器使用的查找表中,通过高压运算放大器驱动 PZT;随着点数的增加,从头到尾经过查找表,并将储存在那里的值输出到 D/A 转换器;还要使相位移与记忆位置(及时间)成线性关系。消除非线性误差的方法是先找到位相已经改变  $2\pi$  的数据点,通过起点到终点画一条直线,然后逐点查找看其是否在该直线上。如果不在直线上,则在记忆中找到给出要求输出的值,将其正确的值放到正确的记忆位置上。这个算法能校正 PZT 运动中任何形式的非线性误差,使 PZT 只有在以不变的速率移动时才开始读取数据。

(2)用几个不同的软件对检波器测量结果进行数据的采集、处理和显示。

为了得到完整的位相,需要去除那些因反正切程序而引入的  $2\pi$  位相(不连续点),使位相图积分成平滑表面。

位相数据的分析包括帧图像的平均和叠加,以及像差的扣除。

(3)工作台的运动采用步进电机数控装置。以步进电机作为执行元件,直接控制机作为步进电机驱动电源的控制部件。通过计算机软件控制步进电机的启动、转速、方向、步数和停止等。同时可以通过微计算机接口电路实现其它各种自动控制的功能。

### 2. 反馈控制软件

反馈控制软件是根据位相数据计算抛光模运动路线的软件。积分的位相数据编码成 16bit 的整数,从直接控制机串行地输送

到如 IBM PC 等微计算机。这些数据被用来计算驻留函数和抛光模的运动路线,然后这个运动路线通过串接方式送回控制机中。

反馈控制软件的程序如图 1-8 所示,简要介绍如下:

(1)在计算驻留函数之前要用一个程序来检查积分位相数据中的异常点。对于由杂光而引起的光瞳外的一些数据,只要简单地

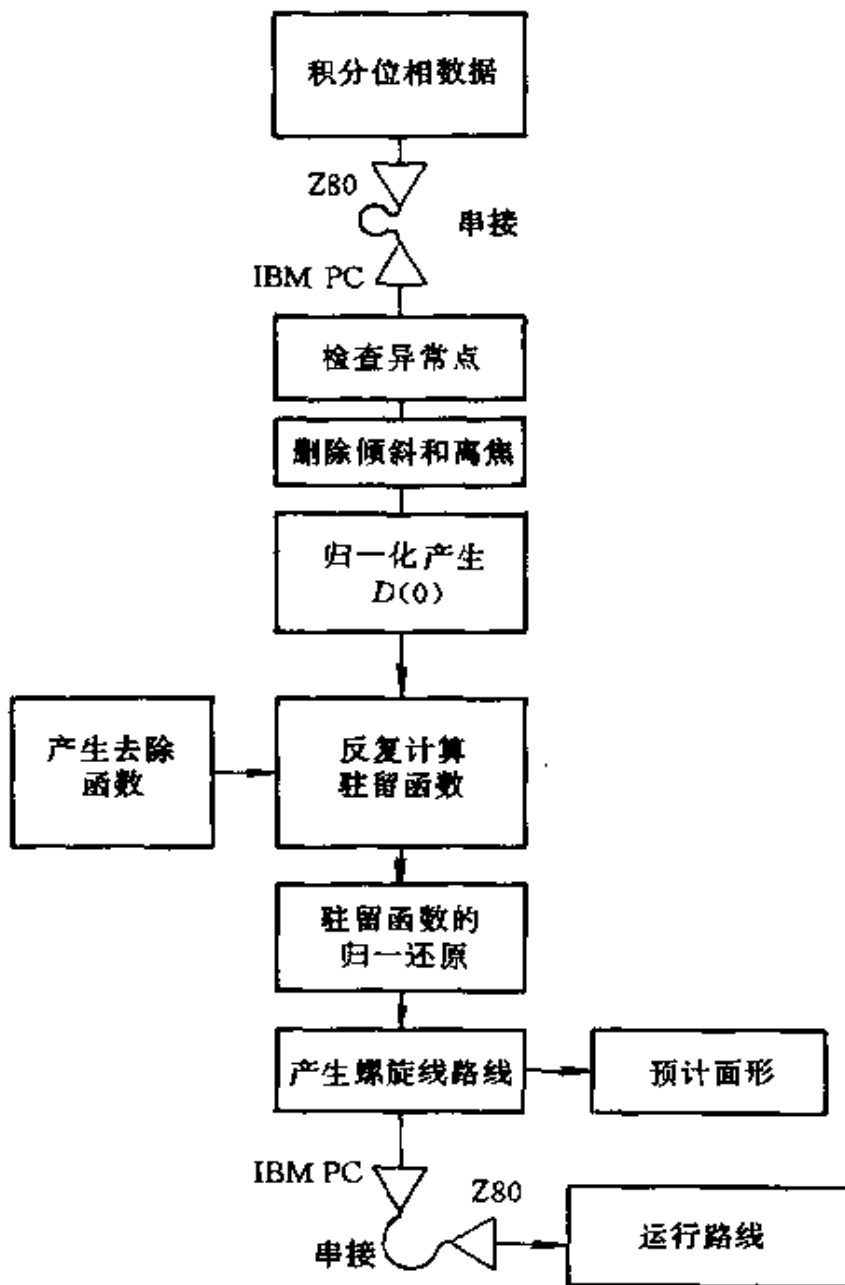


图 1-8 反馈控制软件的程序

使所有在圆形光瞳外的数据都永远是零就可以被去除。

对因为检波器饱和、光线不足或信号反差太小而引起的光瞳内的无数据点可以用线性插值法从周围的数据点求得其位相值。

(2) 异常点改正后, 数据往往要扣除由于倾斜和离焦等因素而产生的像差。这可以用最小二乘法将积分位相数据与 Zernike 多项式拟合的方法来扣除。

(3) 用一个数据处理程序使位相数据归一化, 归一后表面面形的最小值为零, 最大值为 256。

(4) 计算驻留函数。

(5) 计算出抛光模的运动路线。

卷积计算时通常采用垂直扫描的路线, 这种路线对实际的抛光模来说是不适用的, 因为抛光模在每行的末尾必须反向运动。这就是说, 为了保持端点的正确的驻留时间, 驱动电机必须能提供很大的加速度, 显然这是不可取的。

更合适的路线应该是螺旋线。抛光模应从表面的中心出发按螺旋线一直运动到零件的边缘。

螺旋线运动的方程可写成

$$r = r_0 + \rho n \quad (1-29)$$

$$\theta = \theta_0 + \alpha n \quad (1-30)$$

式中,  $r_0$  为出发矢径。从中心出发时  $r_0 = 0$ ;

$n$  为步数(相当于时间);

$\rho$  为矢径相对于  $n$  的变化速率;

$\theta_0$  为出发角;

$\alpha$  为角度相对于  $n$  的变化率。

因此有

$$x_s = r \sin \theta \quad (1-31)$$

$$y_s = r \cos \theta \quad (1-32)$$

式中,  $x_s$  是工作台在  $x$  方向上的坐标,  $y_s$  是在  $y$  方向的坐标。改变  $\rho$  或  $\alpha$  的符号, 螺旋线就可以逆行, 因而抛光模可以回到它出发的

位置上。如果螺旋线足够密,零件表面就会得到较好的预期效果。

通过迭代卷积过程可知道零件上离散点上的驻留函数。而实际上抛光模的运动轨迹是由多段折线组成的螺旋线或圆弧轨迹。要计算抛光模在零件表面沿轨迹移动时在每段折线长度上所需的时间,可采用两种方案:

第一种方案如图 1-9(a)所示,只需单纯地计算通过每个相同方格形状的驻留单元区域时折线的长度。抛光模通过这一区域时的时间就等于轨迹在该区域的长度除以驻留函数值。

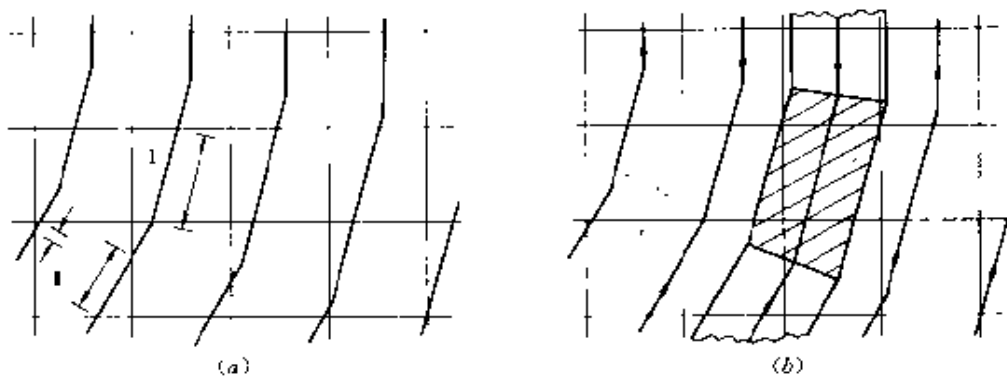


图 1-9 计算沿轨迹的驻留时间

(a)在形状相同的区域内计算;(b)在小梯形区域内计算。

如果轨迹在全驻留单元区域内仅通过一次,如图 1-9(a)中 I 的情况,就可以用二维高斯积分直接求得驻留时间。如果已知直角坐标中的驻留函数为  $D(x, y)$ ,积分区域又是圆环时,用极坐标计算就更为方便<sup>[1.5]</sup>。

设在第  $m$  段折线上停留的时间为  $wd(m)$ ,则

$$wd(m) = \iint_{x_1, y_1}^{x_2, y_2} D(x, y) dx dy = \iint_{\theta_1, \rho_1}^{\theta_2, \rho_2} f(\rho, \theta) \rho d\rho d\theta = \iint_{\theta_1, \rho_1}^{\theta_2, \rho_2} G(\rho, \theta) d\rho d\theta \quad (1-33)$$

其中

$$D(x, y) = f(\rho, \theta)$$

$$dxdy = \rho d\rho d\theta$$

$$G(\rho, \theta) = f(\rho, \theta) \cdot \rho$$

由此,我们得

$$wd(m) = \frac{\theta_2 - \theta_1}{2} \cdot \frac{\rho_2 - \rho_1}{2} \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 H(r, s) dr ds =$$

$$\frac{\theta_2 - \theta_1}{2} \cdot \frac{\rho_2 - \rho_1}{2} \left( \sum_{i=1}^K \sum_{j=1}^K H(r_i, s_j) w_i w_j \right) \quad (1-34)$$

式中,  $K$  是高斯点数;  $r_i, s_j$  是高斯型点;  $w_i, w_j$  是高斯系数。

这些参数值可在计算手册中查到。

如果轨迹通过该区域的次数多于一次,如图 1-9(a)中 I 的情况,计算就复杂得多。

第二种方案如图 1-9(b)所示。此时每个驻留单元区域的形状是变化的,以便和轨迹的形状相匹配。当轨迹是折线组成的螺旋线时,驻留单元就是小梯形区域。在每个小梯形里,抛光模停留的时间是驻留函数在这一区域的积分

$$t_A = \int_y \int_x D(x, y) dx dy \quad (1-35)$$

### 三、典型的数控抛光机床

#### (一) Itek 公司的非球面抛光机床

在 60 年代末, Itek 公司成功地制造了第一台大型的  $x-y$  坐标系统的计算机控制抛光机床。工作台用计算机控制并驱动一个尺寸比工件小的沥青抛光模在工件表面上运动。计算机对干涉图进行分析并使工作台移动。

首先对干涉图进行扫描和分析,然后计算机根据抛光模的尺寸给出去除量方程。为了求出抛光模运动的轨迹,将被加工表面的干涉图形用计算机画出等高线图,并将表面和抛光模划分成许多大小相同的六角形图案,从而计算出抛光模通过每个小面积中心的次数,如图 1-10 所示<sup>[1.6]</sup>。

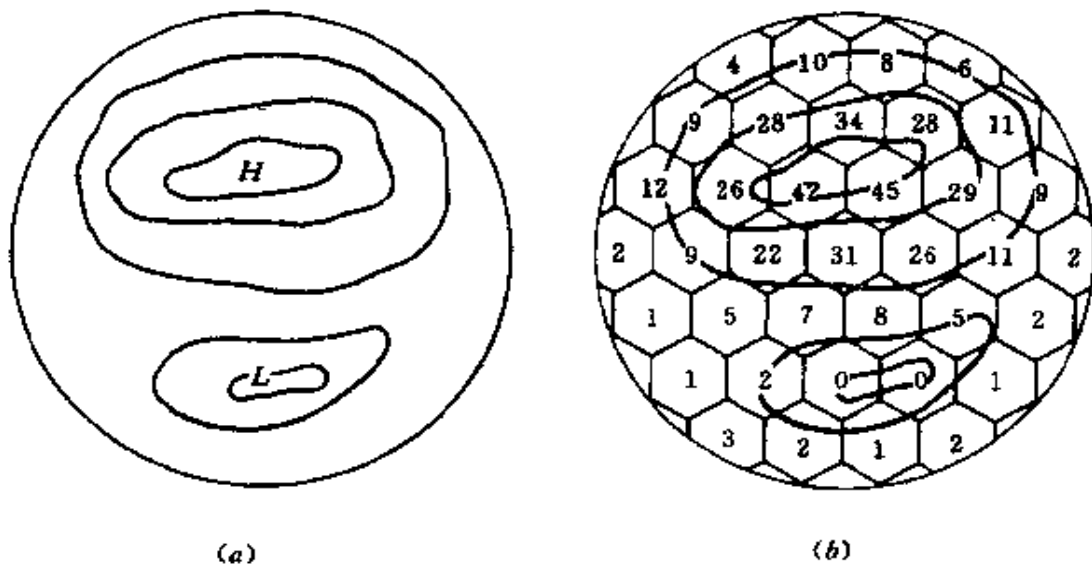


图 1-10 表面误差  
(a)误差等高线;(b)六角形图。

抛光模先定位在最高的区域,然后在高区附近以连续的轨迹运动,每通过一个六角形区域,该区域的通过次数减 1。此过程一直进行到所有六角形的通过次数之差为最小值。如果残留误差太大或所需的时间太长时,通过计算机计算更换抛光模的尺寸。在每一个抛光工序结束时,可以再一次记录干涉图形和测得残留误差。整个过程重复数次,直到表面误差减小到允许的程度。

用该机床抛光了球面零件,其面形误差的均方根值小于  $1/40$  波长。用它还加工了非球面度超过 200 个波长的离轴非球面零件。

#### (二)Perkin—Elmer 公司的计算机控制非球面加工机床

该机床也是采用直角坐标系统,它与 Itek 机床的区别是:

(1)不像 Itek 机床那样采用移动单纯圆周旋转的抛光模,这种机床用一个很小的抛光模,它在很小的区域内作快速的外摆线运动。用改变自转中心和公转中心的距离及摆线运动的速度可以得到一大群去除函数的形式。最方便的去除函数是中心有峰值的那一种。

(2)抛光模不是从高点到高点的移动,而是在工件表面上作螺

旋线运动。工件表面上任意一点的材料去除量是由抛光模在该区域停留时间的长短来决定。根据已知的表面误差,经计算得到表面驻留函数,从而计算机控制在任何给定区域的抛光模的驻留时间。

在机床的主轴端装有压缩空气头,使抛光模保持在恒压下工作。主轴和抛光模是用球铰链连接,它可以使抛光模在任何方向上倾斜以便能使它和工件表面很好地接触。

计算机控制抛光加工是采用迭代方式进行的。首先,必须对加工表面进行测量,以便提供表面误差的数据。当使用位相测量的干涉仪时,能直接得到这个数据。如果测量时得到的是干涉图,就必须对此干涉图形进行扫描,并将得到的数据进行分析,然后产生数字的表面误差数据。接着将测量得到的表面误差与加工前计算机所预计的误差相比较,从而可以选定下一个循环所采用的参数和驻留函数,并用此控制抛光模的抛光过程。待加工到所需的时间后,工件表面再次被测量,重复上述循环直到达到要求为止。

计算机能控制这个机床的五个运动: $x$ 、 $y$  导轨的运动,两个方向上的倾斜和主轴的轴向位移。当抛光模在工件表面上运动时,计算机通过编码器得到抛光模位置的正确信息。对每一步来说,计算机要决定所需的速度以便使抛光模在规定的时间内从当时所测的位置移动到下一个要求的位置上去。通过一个中接口将这些速度值送给五个速度伺服机构。使用编码器可以监视其位置,以避免产生与规定路线的位置偏离。

## 1.3 金刚石车削加工技术

### 1.3.1 概述

用天然单晶金刚石做刀具,在计算机控制下车削加工光学表面是 80 年代初期发展起来的新技术。金刚石车削光学零件技术的迅速发展和金刚石车削机床的商品化使我们有可能重复地加工高精度的复杂面形的光学零件。

这种加工技术在非球面光学零件的生产中具有最显著的经济效益。同时它还可以用来加工扫描反射镜、激光反射镜、计算机软

盘、复制用母模、模压成型的型芯、锥形零件以及其它一些要求机械精度(如平面度、垂直度、平行度和同心度等)很高的非光学零件。另外,在加工光学表面的同时还可以加工出精确的定位面。因此,不仅加快了单块光学零件的加工速度,而且还节省了装配、校正和定心等辅助时间。

最初,用金刚石车削的表而存在着肉眼看得见的加工印迹,所以只能用在远红外波长( $8\sim 12\mu\text{m}$ )。经稍稍抛光后,此表面可以在较短的波长( $3\sim 5\mu\text{m}$ )处使用。随着空气轴承、导轨和金刚石刀具的发展,以及在对加工过程进行深入研究后认识到改变切削参数的重要作用,现在已经可以加工出用于工作波长为  $623.8\text{nm}$  (He—Ne 激光器)的光学表面。金刚石车削的非球面反射镜也已经成功地用在大量生产的紫外光学仪器中(波长为  $180\text{nm}$ )。在这种仪器中,反射镜用作集能器,所以可以不考虑加工印迹对性能的影响。如果要在短波长情况下成像,那末还需要将其表面进行后续抛光。

金刚石车削所得的金属反射镜表面比一般抛光加工的表面更能经受高能量激光束的照射而不发生表面损伤,并且不易变暗或被腐蚀。加工造成的表面塌边也很小。

### 1.3.2 金刚石车削加工工艺

#### 一、基本原理

在金刚石车削加工时,由于单晶天然金刚石非常坚硬而尖锐,可以认为材料的去除是在一个很薄的剪切区域内的剪切过程。在加工时不产生切削刃接触区,而且没有边缘的流动变形,这一剪切区从切削端向前延伸,如图 1-11 所示<sup>[1,7]</sup>。

光滑的金刚石尖端可以使加工表面具有最小的残余应力和理想的粗糙度。图 1-12 是在刀具运动的垂直方向上,金刚石车削表面的轮廓图<sup>[1,8]</sup>。左边是理想的情况;右边为刀具具有小缺口时实际的表面轮廓。

根据金刚石切削刃的几何形状和刀具每转的进给量,可以计



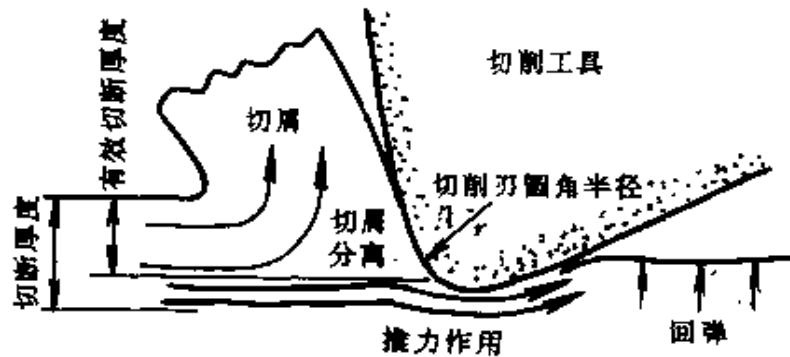


图 1-11 金刚石车削的剪切作用

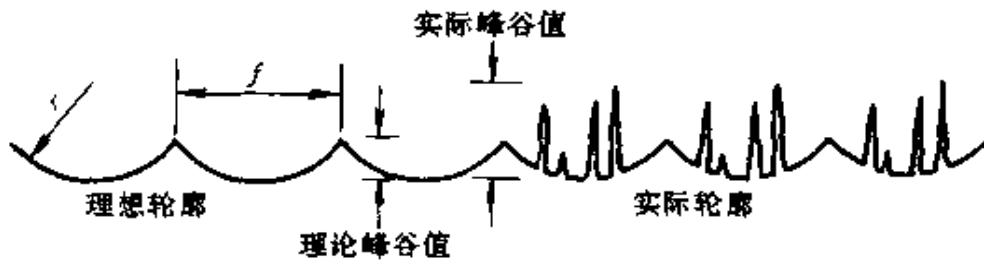


图 1-12 金刚石车削表面的轮廓

算理论的表面粗糙度  $R_{th}$ ：

$$R_{th} = f^2/8r \quad (1-36)$$

式中,  $f$  为刀具每转的进给量,  $\mu\text{m}/\text{r}$ ;  $r$  为金刚石刀尖的半径,  $\text{mm}$ 。

## 二、金刚石刀具

天然单晶金刚石作为切削刀具,它具有很多独特的性质,主要的性质如表 1-1 所示<sup>[1.7]</sup>。

由此可以看出用金刚石作为刀具材料时有以下一些优点:

- (1) 硬度非常高,因而它的磨耗率很小。
- (2) 锋利性好,单晶的结构允许切削刃锋利到那些多晶或孕镶磨具所无法达到的程度。
- (3) 摩擦因数非常小,切屑容易从刀具工作面上排出。
- (4) 导热性好,从而产生的热量能从刀尖上散布出去。
- (5) 化学惰性好,没有腐蚀作用。因而切屑不易积聚。这种积聚现象在用硬质合金或其他切削工具加工时是普遍存在的。

表 1-1 单晶金刚石的性质

性质	实测值	备注
密度	$3.52 \times 10^3 \text{kg/m}^3$	
压痕硬度	$60000 \sim 100000 \text{N/mm}^2$	随方位和温度而变
杨氏模量	$10.5 \times 10^{11} \text{N/m}^2$	各方向大致相同
拉伸强度	$3 \sim 20 \times 10^9 \text{N/m}^2$	
开始氧化温度	900~1000K	
开始石墨化温度	1800K(不活泼气氛中), 900K(铁粉中)	
比热容	$0.516 \times 10^3 \text{J/kg} \cdot \text{K}$ (常温)	
热导率	600~1000W/m·K(含氮) 2000~2100W/m·K(不含氮)	
线膨胀系数	$0.8 \times 10^{-6}$ (常温) $1.5 \sim 4.8 \times 10^{-6}$ (400~1200K)	
表面能	$5.5 \text{J/m}^2$ (111)面	

(6)膨胀系数小。这能保证刀具几何形状的稳定性和有利于改善加工表面的质量。

在金刚石车削加工中,刀具应该具有精确的几何特性(包括前角、后角、刀刃半径等)。根据加工的材料、加工表面的几何形状和光学要求(如工作波长)来选择刀具,这也许是金刚石车削加工中最困难和关键的一步。刀具的误差和刃端的损坏都会降低加工后的表面质量。

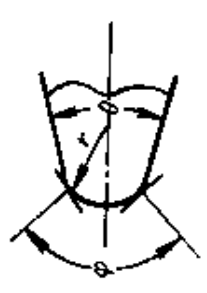
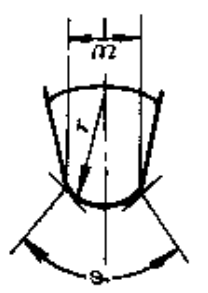
车削非球面时,金刚石刀具的刀尖一般如表 1-2 所示<sup>[1-9]</sup>。

对于金刚石切削工具的设计、制作和选择有以下几条衡量的标准:

#### (1)刀尖的锋利程度和它的稳定性

刀尖越锋利(刀尖的圆弧半径越小),切削厚度越小,排屑就越稳定。到目前为止,确认金刚石刀具的最小切削厚度可达 1nm。但从强度和热容量来说,刀尖很容易被磨损,为了保持刀尖的稳定性,工具应有适当的圆弧。

表 1-2 非球面超精密切削时用的刃尖

刃尖形状	轮廓精度			圆弧半径 $r/\text{mm}$	刃尖角 $\theta$	刃宽 $w/\text{mm}$	后角 $\alpha$	前角 $\beta$
	$\varphi \leq 90^\circ$	$\varphi \leq 120^\circ$	$\varphi \leq 150^\circ$					
	超精级	0.05 $\mu\text{m}$	0.15 $\mu\text{m}$	0.03~3	15°以上	—	0°~20°	-30°~10°
	精级	0.5 $\mu\text{m}$	1.0 $\mu\text{m}$					
	超精级	0.05 $\mu\text{m}$	0.15 $\mu\text{m}$	0.10~200	—	0.5~5.0	0°~20°	-30°~10°
	精级	0.5 $\mu\text{m}$	1.0 $\mu\text{m}$					

## (2) 切削刃的光滑程度

如果刀具轮廓能完全复制到完工表面的话,切削刃的光滑程度决定了完工表面的光滑程度。金刚石刀具要经过仔细的抛光,经抛光后切削刃的粗糙度可达几个纳米的程度。

## (3) 被加工材料和其亲和性

具有光滑抛光面的切削刃的轮廓完全向工件转移,这只是理想状态。实际上,在刀具的后面和被加工材料的界面处会产生粘附、形成游离粒子或化学反应。这些都可能破坏这种理想的复制性。

## (4) 刀尖强度

对于精密切削刀具来说,耐磨性是很重要的,但还必须注意刀具的崩刃,产生崩刃时加工面就出现缺陷。

## (5) 热化学性

包括热分解性,氧化性和被切削材料之间的溶解性,扩散性,化学反应等等。

# 三、精密数控机床

## (一) 机床的配置形式和基本要求

一般来说,金刚石车削机床中刀具和工件的配置有以下三种基本形式:

### 1. 飞刀

这一配置可以比作一般的铣床。通常有一个在空气轴承的转轴上轴向安装的金金刚石刀具,工件在空气导轨和(或)转动的工作台上移动。机床的结构如图 1-13 所示<sup>[1.10]</sup>。这一类机床用来加工平面零件——简单的反射镜、转动棱锥和多面体扫描反射镜等。

### 2. 线性车削和端面加工

这种配置类似于通用机床。工件安装在空气轴承的转轴上,而刀具则在一个空气导轨上作直线运动。机床结构如图 1-14 所示<sup>[1.10]</sup>。一般用来加工直线圆柱面和锥面。

### 3. 成型机床

可选择几组工件和刀具的自由度。沿这些自由度的运动可由

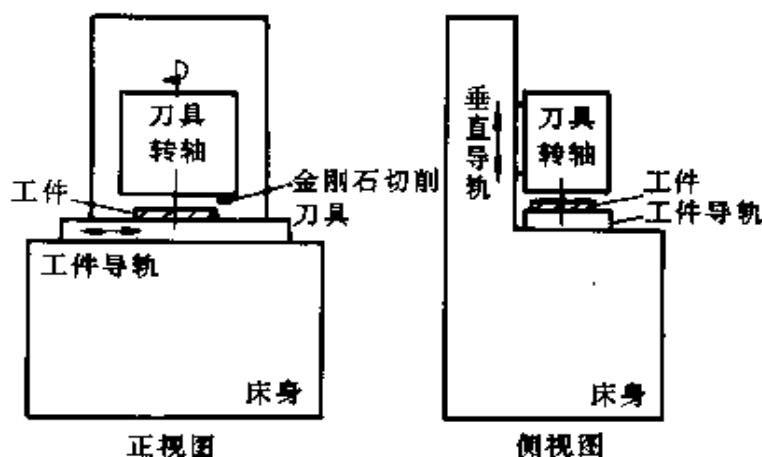


图 1-13 金刚石车削飞刀

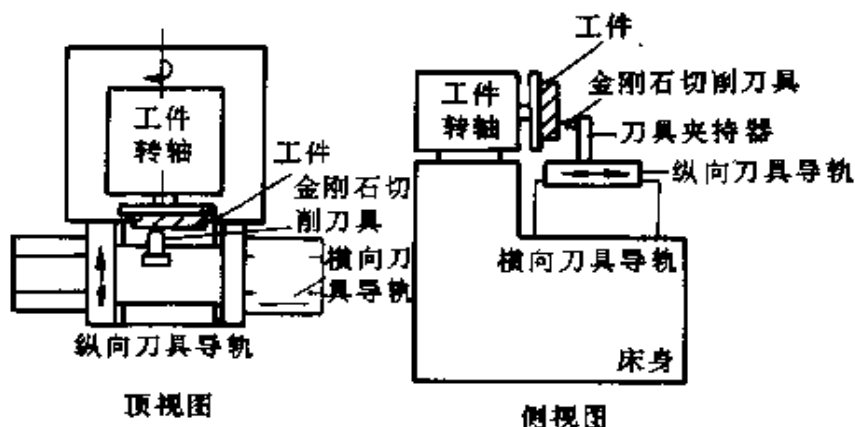


图 1-14 端面车削

计算机来控制。从而实现多种球面和非球面的成型。常见的配置有  $x-\theta$ ,  $z-\theta$  和  $R-\theta$  这几种。 $x-y$  的这种配置较适合于加工各种校正板, 而其余的几种配置则用来加工圆柱面、锥面、抛物面或双曲面等回转而。机床的结构如图 1-15 所示<sup>[1,10]</sup>。

还有一种称为“弦发生器”的机床。在整个成型过程中切削刀具永远垂直于工件的表面, 因此在成型时不要求对刀具的误差进行修正。用它稳定而精确地加工中等非球面度的回转非球表面。

为了使金刚石车削机床达到很高的运动精度, 必须采用有空气轴承的转轴和液压或摩擦力小的滚子导轨。为了防止机床以及

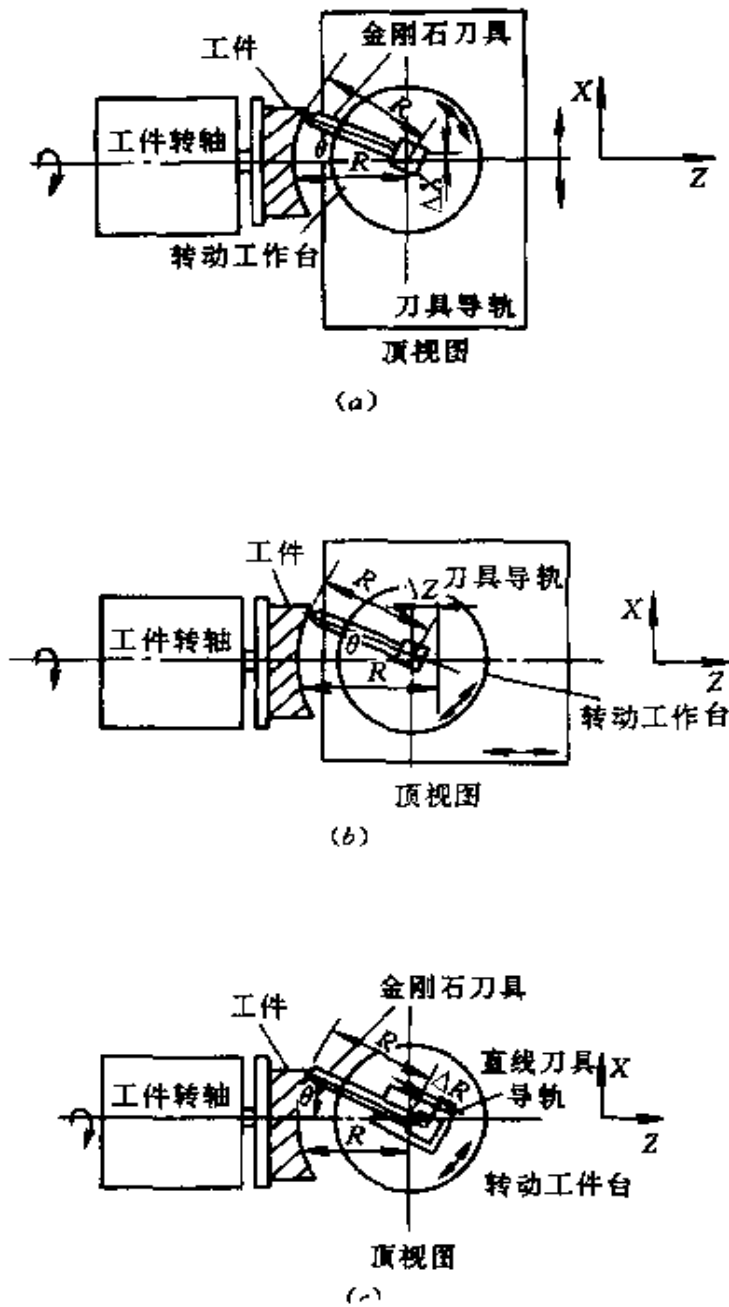


图 1-15 成型机床

(a) $x-\theta$ 成型机床;(b) $z-\theta$ 成型机床;(c) $R-\theta$ 成型机床。

环境的振动对加工精度的影响,机床大多有坚实的大理石底座和防震的隔离地基,机床还应放置在稳定的、有温度和湿度控制的环境中。电机和传动皮带都要经过仔细挑选以减少由于它们带来的

振动。

机床上刀具和工件运动的导向控制部件要与参考面校准,需要时还要能提供位置的反馈信号。此时要用到激光对准系统、加工过程中测量用的干涉仪、压电传感器和伺服定位装置。

工件一般要进行平衡,以减小产生周期误差的可能性。设计夹具时,应使其在夹持工件时不产生应力,以保证当工件从夹具上取下时不发生变形。

零件的装夹问题往往会被忽视。特别是大零件,其装夹误差限制了金刚石车削的精度,甚至小零件也会由于装夹不合适而使金刚石车削后的表面出现无法解释的表面误差。一般常常采用真空夹具。

另外,要使用真空排屑装置,以避免切屑划伤已加工好的表面。因为金刚石车削特别适合于加工软金属材料,而且会产生加工硬化现象。所以一般来说,切屑的硬度要比金属本体的硬度大,它很容易划伤已加工的表面。因此,不论是干切削或用冷却液冷却时都要配备有真空排屑装置。

## (二)具有空气轴承的转轴

很显然,被加工表面的精度不能比转轴的精度还高。为了使工件得到高的加工精度和表面质量,要采用具有空气轴承的转轴,以消除转动的振动和卡死现象,减小轴向和径向的跳动量。

尽管滚动轴承至今已经发展到很高的水平,但它们的几何精度仍然有一定的限度,而且常常产生小的运动误差。在加工中,这些误差会综合起来造成周期性的轴向误差,最小也有 $3\sim 5\mu\text{m}$ 。另外,因滚动轴承的热传导性很差而产生的热量会引起更大的误差。

空气轴承能补偿加工误差,以致使转动精度比滚动轴承要高 $10\sim 20$ 倍。空气轴承具有良好的导热性,只需很低的起动扭矩。假如使用和保养恰当,实际上可以无限期的使用。

空气轴承的以上这些优点不仅使精密加工机床免除噪音,而且大大改善了热稳定性和机械稳定性。

图 1-16 为一种超精密空气轴承转轴的结构<sup>[1,11]</sup>。这种主轴的最重要的部件是球形转轴、球形轴承和轴颈轴承。选择球面转轴而不是普通的柱面的原因是球面的制造精度比柱面更高。转轴的一端装有一个球形轴承,而另一端是轴颈轴承,轴颈轴承装在一个半球内,用来在装配时达到很高的同轴度。球形轴承和轴颈轴承共同承受径向载荷,而轴向载荷仅由球形轴承承受。受热后转轴向轴颈轴承一端伸长。

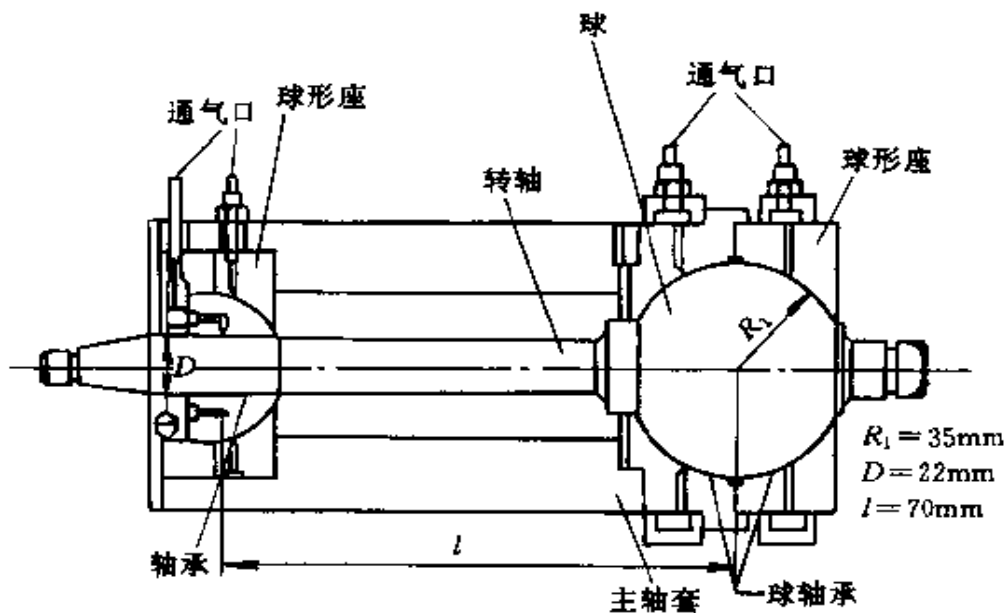


图 1-16 超精密空气轴承转轴

由于球的形状精度对转轴的运动精度有很大的影响,因此要用球面研磨机床使它在赤道平面内的形状精度达到 $0.1\mu\text{m}$ 以内。当空气压力为 $0.78\text{MPa}$ 时,轴向的刚性为 $81.3\text{N}/\mu\text{m}$ ,径向的刚性为 $24.5\text{N}/\mu\text{m}$ 。转速为 $200\text{r}/\text{min}$ 时,轴向的转动精度为 $0.01\mu\text{m}$ ,径向的转动精度为 $0.03\mu\text{m}$ 。

#### 四、加工流程和计算机控制系统

##### (一)加工流程

(1)加工第一个非球面零件时的流程如图 1-17 所示。

(2)成批生产时的流程如图 1-18 所示。



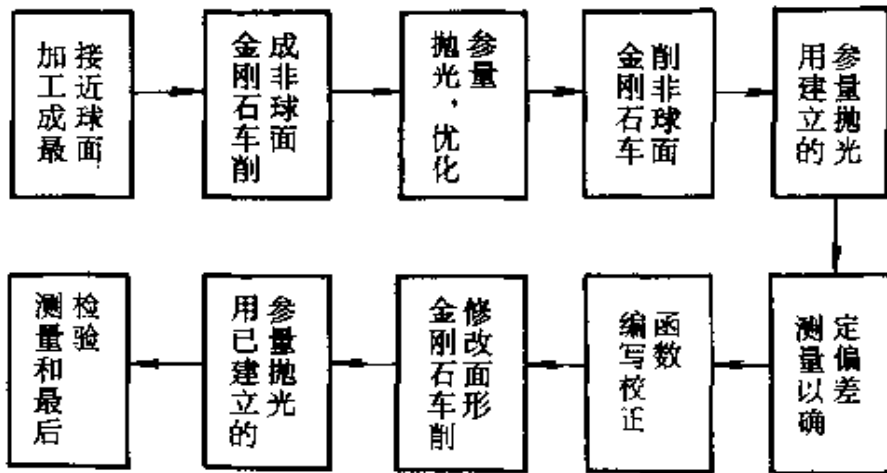


图 1-17 第一个零件的加工流程

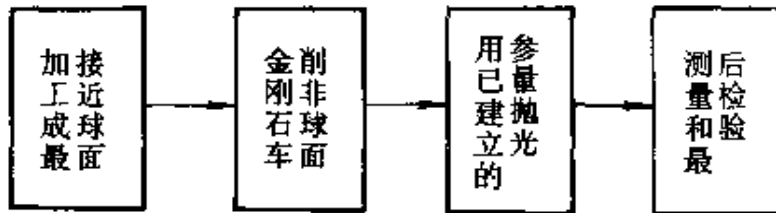


图 1-18 成批生产时的加工流程

首先,将光学表面研磨到最接近的球面。对于某些材料还要注意在粗加工中不能使零件产生应力。

车削成非球面以后还要在专用的抛光机上进行抛光,其目的是:

- (1)在不改变表面形状的情况下去除刀具的印迹;
- (2)消除非球面的带区误差。

抛光后,对表面面形要进行测量和检验,可以估计到在第一个循环中表面肯定会存在偏差,因此要对车削的程序进行修改,以便使加工表面达到预定的最小偏差。然后,再抛光经过修正以后的表面,最后得到所要求的非球面面形。

## (二)计算机控制系统

图 1-19 是微机控制系统的原理图<sup>[1.12]</sup>。

微型计算机可以计算各坐标点的数据,这些计算结果放在寄

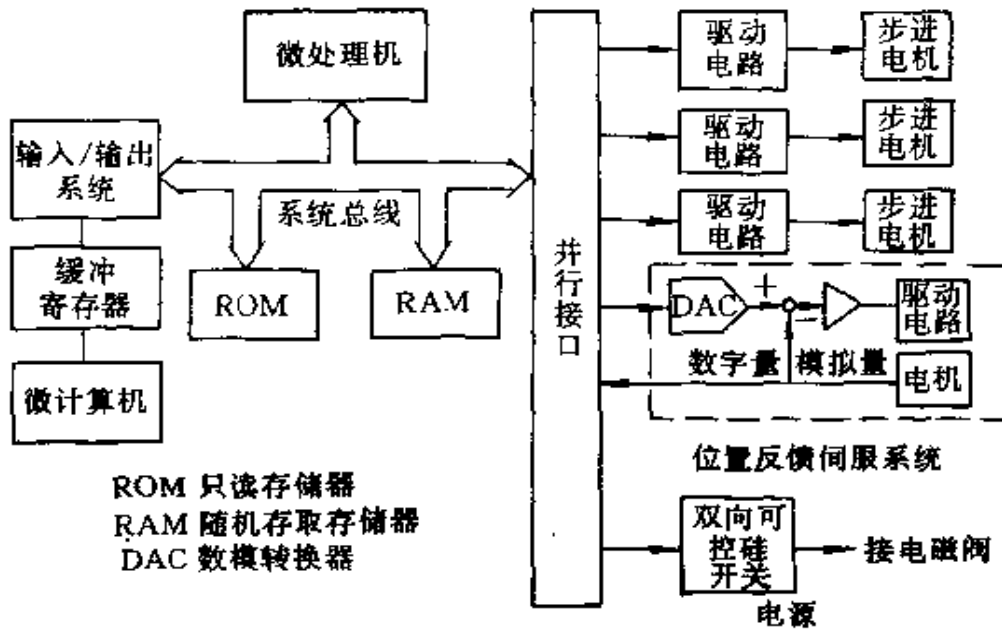


图 1-19 控制系统原理图

寄存器中。用微处理器通过输入/输出系统取出。基本的控制特性存储在只读存储器(ROM)中。微处理器具有从随机存取存储器(RAM)提供的操作记忆。驱动电路将脉冲转换成步进电机的相应位相。

伺服机构将数字的时间基准转换成由直流电机控制的模拟量。

### 1.3.3 典型的加工机床

一、莫尔 M-18 AG 非球面加工机床(Moore M-18 AG Aspheric Generator)

它是一个三轴计算机数控的超精密加工系统。既可以用单点金刚石刀具车削黑色金属及其合金以外的金属、晶体和塑料,又可以用金刚石磨轮对玻璃、黑色金属、有色金属和陶瓷等材料进行磨削。该机床采用 Allen—Bradley 7320 型计算机控制系统。刀具的位置用 Hewlett—Packard 5501 A 型激光干涉反馈系统精确定位。该机床的构造如图 1-20 所示<sup>[1.13]</sup>。

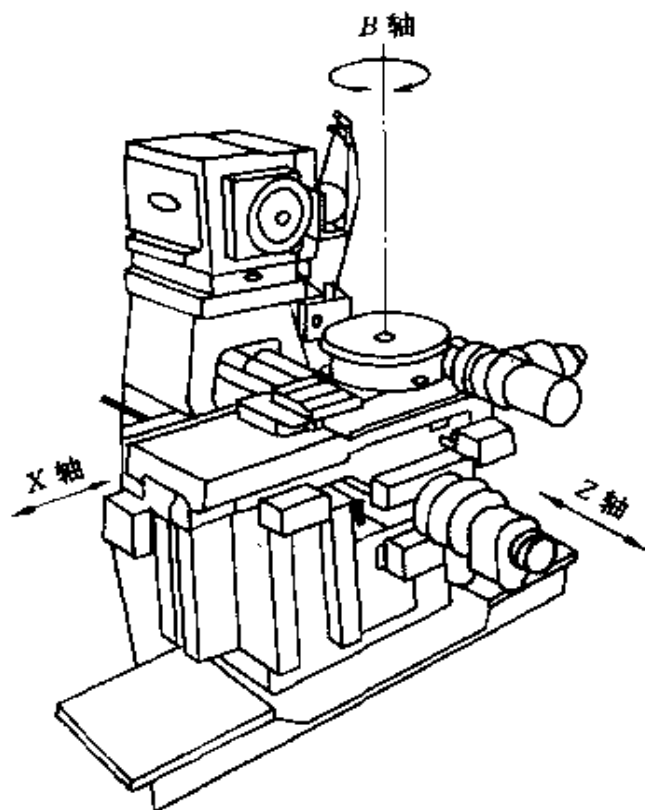


图 1-20 M-18 AG 机床的构造

机床的主要规格是：

X 轴行程	410mm
Z 轴行程	230mm
主轴中心到工作台面距离	292mm
主轴中心到旋转工作台面距离	178mm
X、Z 轴在全行程上的直线性	0.5 $\mu$ m
X、Z 轴在全行程上的垂直度	1"
X、Z 轴在全行程上的偏角	0.5"
X、Z 轴在全行程上的定位精度	1.5 $\mu$ m
X、Z 轴每 25.4mm 行程上的定位精度	0.5 $\mu$ m
B 轴旋转 360°时的角度偏差	$\pm 3''$
X、Z 轴的读数精度	0.025 $\mu$ m
B 轴的读数精度	1.3"

主轴轴向误差  $0.05\mu\text{m}$

## 二、纽默 ASG 2500 型非球面加工机床 (Pneumo ASG2500 Aspheric Generator)

ASG 2500 是双轴高精度计算机控制成型机床。既可以进行单点金刚石刀具车削,又可以用金刚石磨轮进行磨削。该机床采用 Allen—Bradley 8200 计算机数控系统,采用 Hewlett—Packard 激光干涉反馈系统使两导轨精确而同步定位。该机床的结构如图 1-21 所示<sup>[1.13]</sup>。

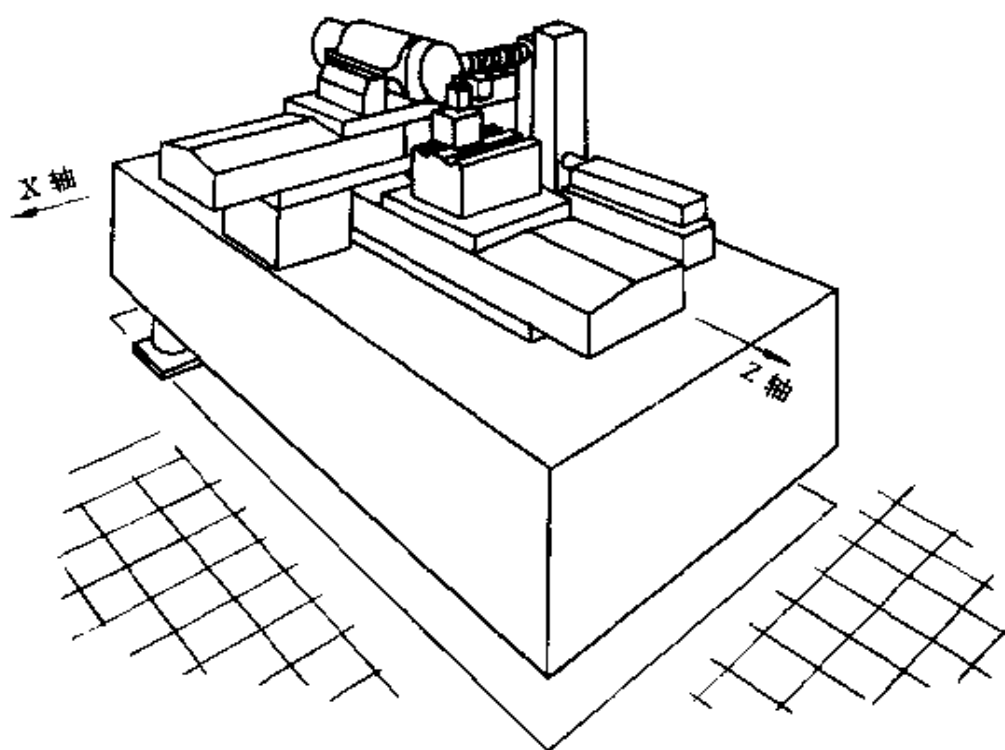


图 1-21 ASG 2500 机床的结构

ASG 2500 机床的规格:

### (1) 工件轴

类型	筒形液压气动轴承,带有后滑板
转速	100~2400r/min
径向/轴向跳动	0.1 $\mu\text{m}$ 以下(总读数)

### (2) 磨轮轴

类型	筒形液压气动轴承,带有后滑板
----	----------------

转速	3000~10000r/min
径向跳动	0.25 $\mu$ m 以下(总读数)
(3) X 轴和 Z 轴轴向直线导轨	
速度	0.25~762mm/min
水平直线度	X 轴 0.5 $\mu$ m 以下(全行程) Z 轴 0.3 $\mu$ m 以下(全行程)
行程	X 轴 254mm Z 轴 152mm
(4) 控制和反馈系统	
分辨率	10nm
特点	对温度、湿度和大气压可以补偿
(5) 工件尺寸	
凹面	最大直径 150mm, 最大矢高 38mm
凸面	最大直径 150mm, 最大矢高 75mm

#### 1.3.4 可用金刚石刀具车削的材料

目前,金刚石车削仅局限于加工那些在物理和化学性能上都和金刚石匹配的材料。表 1-3 列出了能用金刚石车削方法成功地加工光学表面的材料。它们主要是一些不含碳的软可塑金属、晶体和塑料。

铍、钼、钛、镍和黑色金属不能用单晶金刚石刀具满意地进行加工。不能加工黑色金属的原因是金刚石和碳之间的化学作用,因为金刚石刀具在加工这些材料时会产生石墨化,从而毁坏刀具。铍、钼、钛和镍会使刀具的切削刃迅速被磨损,从而无法控制表面粗糙度和成型精度。但它可以选作为光学零件的载体,在其上面镀上一层可以用金刚石车削加工的薄膜材料,再经车削而获得光学表面。

一些用通常方法较难抛光的材料,如铜、塑料、锗和硅等,用金

表 1-3 可用金刚石刀具车削的材料

金 属	塑 料	晶 体
铝合金	PMMA	锗
铜	PC	硫化锌
铍青铜	PS	硒化锌
黄铜	NAS	氟化钙
锡	SAN	氟化钡
银	CR-39	硅
金	TPX	碲化镉
铈		碲镉汞
镍(非电解)		砷化镓
		铈酸锂
		磷酸二氢钾(KDP)

刚石车削能得到很好的效果。

金刚石车削加工在光学表面加工中的作用将会不断扩大。目前正在进行刀具、切削方法、材料、冷却液和动力学条件的相互作用等方面的研究,目的在于扩大可加工材料的品种。不远的将来就可以用金刚石车削单晶硅和镍。还有报导认为,黑色金属可以在碳饱和气氛下用金刚石车削。另一个潜在的应用是金刚石车削脆性材料,如玻璃等。有可能用金刚石刀具和精密机床在一定的工艺条件下车削玻璃,其条件包括提高温度,改变应力状态,改变环境气氛,或改变玻璃的化学性质等。

### 1.3.5 非电解镍光学表面的金刚石车削

在使用金刚石刀具切削的材料中,最普遍使用的是铜和铝。用单晶金刚石切削铜或铜合金时,表面粗糙度可达到  $0.002\mu\text{m}$  (RMS)。但由于它们的硬度低,因此很容易因清洗或处理时的磨损或腐蚀而被损坏。

一般的纯镍在高温下将成为碳的溶媒,所以用金刚石刀具切削时会使刀尖产生显著的损耗,从而不能进行镍的切削。非电解镍是由次亚磷酸盐的还原作用从镍的络合物中析出而沉积成的膜层,是镍磷合金,磷的含量与膜层的性质有很密切的关系。表 1-4

表 1-4 非电解镍的特性

密度	$\approx 7.85 \times 10^3 \text{kg/m}^3$
熔点	$\approx 890^\circ\text{C}$
热膨胀系数	$13 \times 10^{-6} \text{C}^{-1}$
努普(Knoop)硬度	$7000 \text{N/mm}^2$

为非电解镍的主要物理特性。

非电解镍膜的努普硬度比无氧铜( $750 \text{N/mm}^2$ )大很多,所以是较硬的材料。当用刀尖半径  $R=5 \text{mm}$  的金刚石刀具切削磷含量为 10.7% 的非电解镍时,若切削速度  $v=10 \text{m/s}$ ,切削深度  $\Delta=2 \mu\text{m}$ ,进给量  $f=5 \mu\text{m/r}$ ,并用轻油润滑时,表面粗糙度可达  $5 \text{nm}$  ( $R_z$ )。也就是说可以获得与无氧铜或铝等软质金属相同程度的光滑表面。

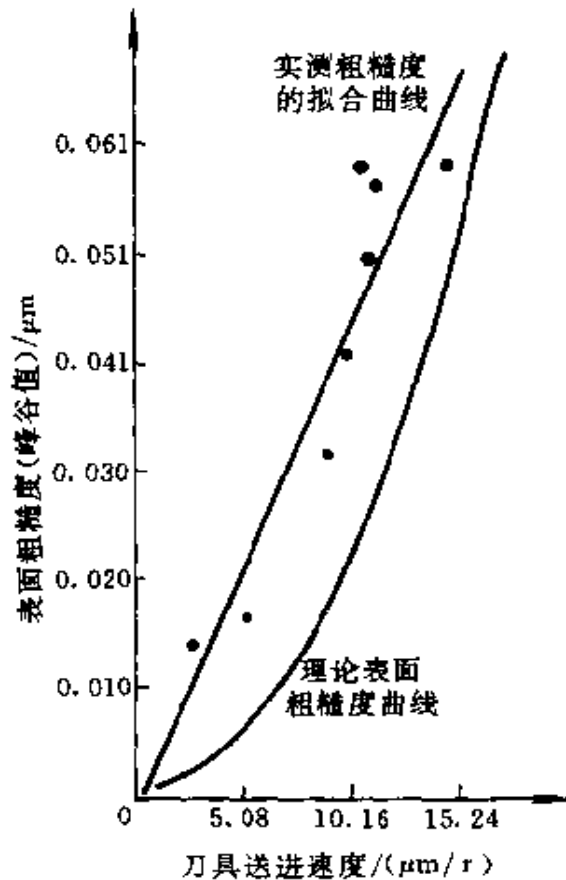


图 1-22 理论粗糙度和实测粗糙度

非电解镍可以在大多数铝合金和大多数不锈钢、殷钢、钛和塑料的表面上沉积。沉积的最大厚度可达 0.5mm。涂层和载体的结合强度随载体的不同而不同。对钢来说,结合强度大约在 205~409MPa 的范围内。

用金刚石刀具车削非电解镍时,一般要求主轴的转速为 350~1000r/min,刀具的送进速度一般为 14~25 $\mu\text{m}/\text{r}$ 。

根据刀尖的圆弧半径和送进速度可以计算出理论的表面粗糙度。图 1-22 为刀尖圆弧半径为 0.53mm 的金刚石刀具车削直径为 103mm 的非电解镍表面时的理论粗糙度和实测粗糙度。

车削时要使用含有脂肪添加剂的纯矿物油。

刀具的磨损量是很小的,刀具的损坏主要不是由磨损造成,而是因为尖端的断裂而使刀具不能使用。

### 1.3.6 光学塑料的金刚石车削

很难用光学抛光方法加工的光学塑料可以用金刚石工具车削的方法得到光滑的光学表面。图 1-23 是各种塑料用金刚石工具切削时工件表面的加工质量<sup>[1.11]</sup>。

由图可知,在加工聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)、聚碳酸酯(PC)、聚丙烯(PP)和高密度聚乙烯(HDPE)等塑料时,表面质量较好。

用金刚石车削聚苯乙烯光学塑料(PS)时,由于在材料破坏时有较大的伸长,所以很难获得光学质量的镜面。对热固性光学塑料 CR-39 来说,因为它比其它塑料更脆,所以用金刚石车削时也很难得到光学质量的表面。图 1-24 和图 1-25 分别给出了切削速度为 7.5m/s、切削深度为 10 $\mu\text{m}$  和用不同刀尖半径的金刚石工具车削 PC 塑料和 CR-39 塑料时表面粗糙度与送进速度的关系<sup>[1.14]</sup>。

图 1-26 是在切削速度为 7.5m/s,切削深度为 10 $\mu\text{m}$ ,用不同刀尖半径的单晶金刚石车削 PMMA 时表面粗糙度和送进速度的关系。可以发现,实测的表面粗糙度和计算的理论粗糙度很接近。表面粗糙度随送进速度的减小而得到改善,图 1-27 所示为刀尖半



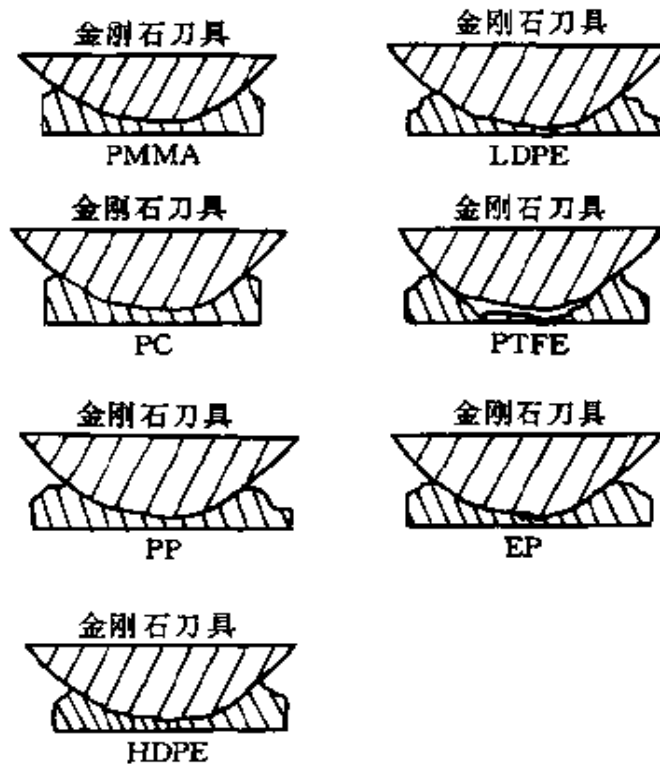


图 1-23 金刚石切削塑料时工件表面的质量

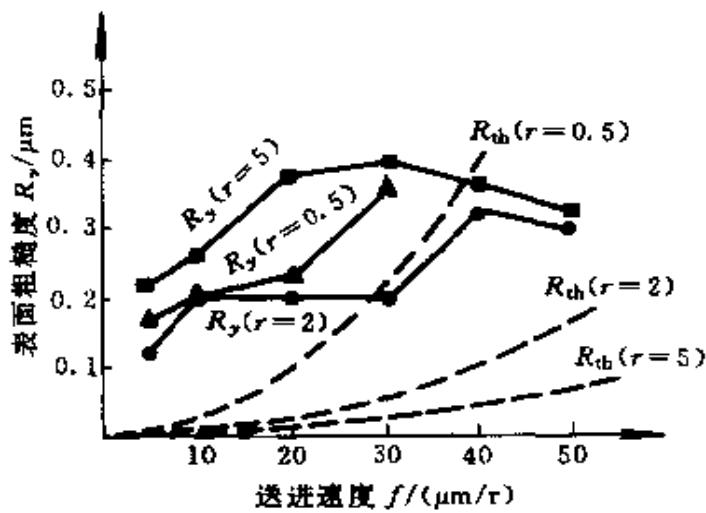


图 1-24 PC 表面粗糙度与进给量的关系

径为 2mm, 切削深度为  $5\mu\text{m}$  时, 不同切削速度时的情况<sup>[1.11]</sup>。

当主轴速度为 12m/s, 车削深度为  $10\mu\text{m}$ , 以及送进速度为

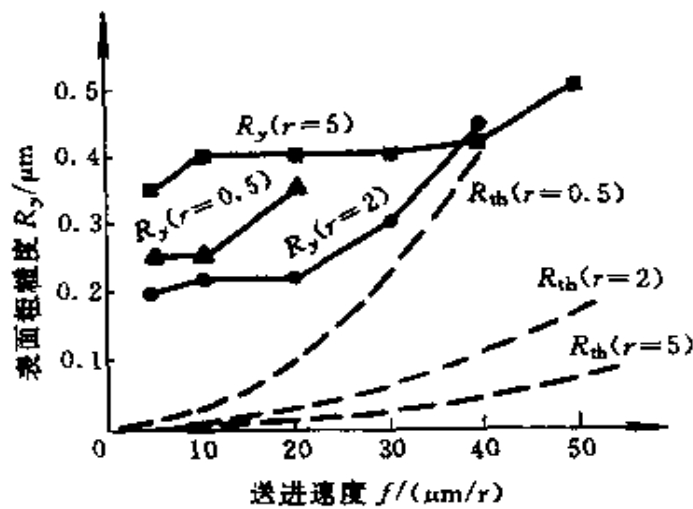


图 1-25 CR-39 表面粗糙度与进给量的关系

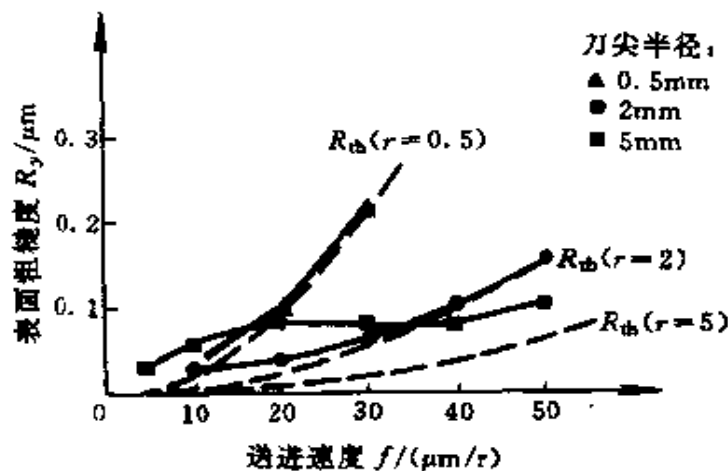


图 1-26 不同刀尖半径时表面粗糙度与送进速度的关系

$3\mu\text{m}/\text{r}$  时,车削表面的质量为最佳,均方根值大约为  $5\text{nm}$ 。所以 PMMA 是用来获得光学表面的最佳塑料。

当使用不同材料的刀具进行车削时,PMMA 表面的粗糙度也不同,图 1-28 所示是用刀尖半径为  $2\text{mm}$  的刀具,在速度为  $7.5\text{m}/\text{s}$ ,切削深度为  $10\mu\text{m}$  时的加工情况<sup>[1.11]</sup>。在实验的三种材料中,单晶金刚石刀具能获得最好的结果。

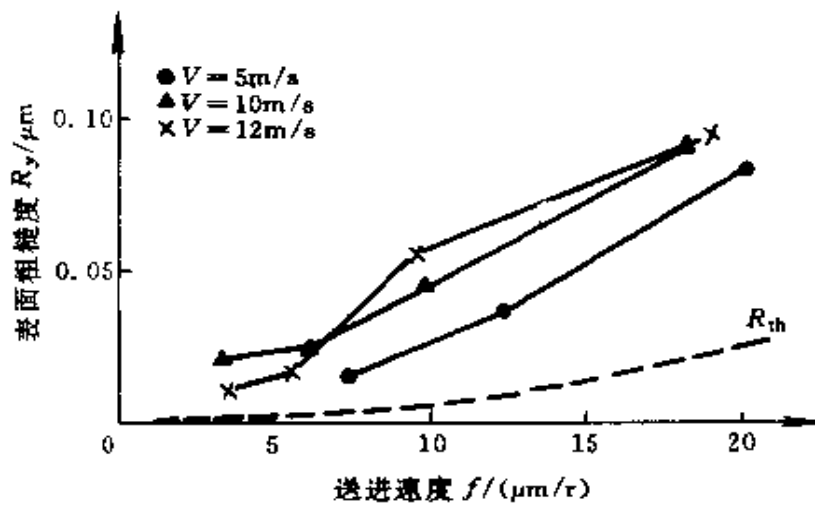


图 1-27 不同切削速度时表面粗糙度与送进速度的关系

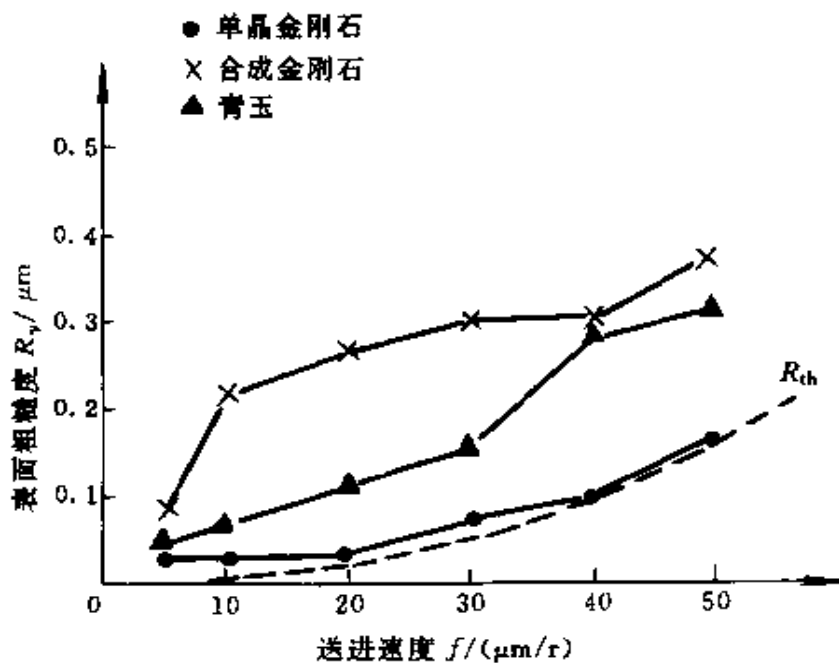


图 1-28 刀具材料对表面粗糙度的影响

## 1.4 离子束抛光技术

### 1.4.1 离子束抛光原理

将惰性气体(如氩、氦、氙等)原子在真空度为  $1.33\text{Pa}$  的条件下用高频或放电等方法使之成为离子,再用  $20\sim 25\text{kV}$  的电压使

其加速,然后撞击到放在真空度为  $1.33 \times 10^{-3} \text{Pa}$  的真空室内的工件表面上,从其表面将材料以原子量级予以去除。这种方法可以对表面材料进行去除厚度达  $10 \sim 20 \mu\text{m}$  的修正加工,从而可以精确地修正表面面形或把球面修改成非球面。

如果用电子束加工玻璃表面的话,电子束将能量传递给玻璃原子的电子层并转换成热量使玻璃熔化蒸发而被去除。这种加工方法会使表面出现严重的变形和产生应力及裂纹等缺陷。

与此相反,用离子束加工玻璃时最主要的特点是不产生热量。这种方法是使被加速的离子与工件材料的原子核直接产生弹性碰撞,将能量直接传给工件材料的原子,使其逸出表面。因此,这种加工几乎不产生热量。如图 1-29 所示<sup>[1,15]</sup>。

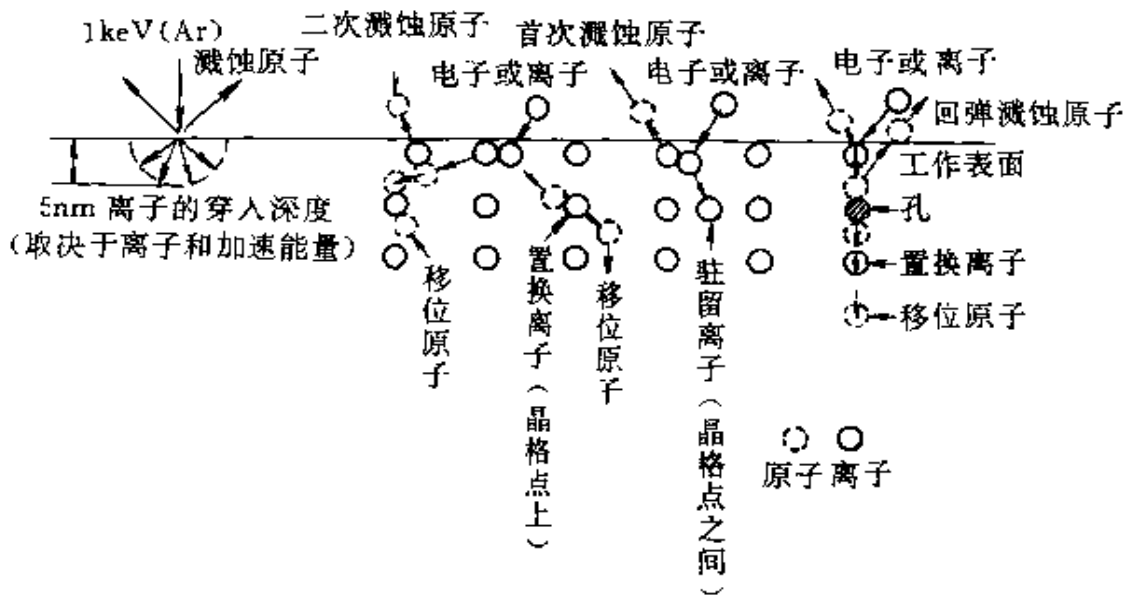


图 1-29 离子抛光机理的示意图

当用具有几十万电子伏特以上能量的离子轰击工件表面时,因其轰击的深度大,可能会破坏物质的原子排列,从而会引起离子能量的损失和因此而放出热量。但是当离子束的能量为几万电子伏特时,离子几乎不侵入物质的内部而主要是同表面原子发生能量的交换。因此,可以认为在这种情况下是不产生热量的。例如,用 15keV 的氩离子轰击玻璃时,当其靶面上的电流密度为

0.25mA/cm<sup>2</sup>时,轰击 5h 后,玻璃表面的温度仅仅达到 85°C。

加速离子将能量传递给固体原子有以下三种形式:

(1)低能量离子(30keV 以下)轰击的情况

离子能量的主要损失是用于和固体原子核的碰撞,可以看成主要是两个原子间类似坚硬的弹性球的碰撞。在最简单的情况下,假设两者在同一直线上进行碰撞,则有

$$E_s = 4E_i \frac{M_1 M_2}{(M_1 + M_2)^2} \quad (1-37)$$

式中, $E_s$  为固体所得到的能量, $E_i$  表示轰击离子所具有的能量, $M_1, M_2$  分别为轰击离子和被轰击固体的原子的质量。

例如,用 10keV 的质子(相对原子质量为 1)轰击硅原子(相对原子质量为 28)时,传递的能量约为 1.33keV。

(2)高能量离子(30keV 以上)轰击的情况

由于存在固体原子电离化等作用,热量交换变得较为复杂,能量的损耗显著增加。

(3)与固体原子直接进行电荷交换的情况

这是当离子速度趋近于反射电子的速度时所发生的特殊情况。

#### 1.4.2 工艺因素的影响

在离子束抛光玻璃时,有关的工艺因素有:溅射率(或称去除系数),离子能量,溅射深度,离子束的入射角以及加工变质层等。

##### 一、溅射率

溅射率定义为被去除的原子数(或克分子数)与碰撞离子数的比值,用符号  $\eta$  表示:

$$\eta = epAdNZ/QM \quad (1-38)$$

式中, $Q$  为总电荷; $A$  为离子束有效截面积,单位 cm<sup>2</sup>; $d$  为加工深度,cm; $Z$  为每个分子的原子数; $M$  为材料的分子量; $N$  为阿伏加德罗常数; $\rho$  为材料的密度; $e$  为静电荷。

举一个例子来说明。如果用 40keV 能量的氩离子轰击熔融石

英,熔融石英的溅射率大约在 1.2~1.8 的范围内。如果我们采用的氙离子束为  $2 \times 10^{15}$  离子数/ $\text{cm}^2 \cdot \text{s}$ , 电流密度为  $30 \mu\text{A}/\text{mm}^2$ , 而且假设其溅射率为 1.5, 则去除的速度就可达到  $3 \times 10^{15}$  原子数/ $\text{cm}^2 \cdot \text{s}$ , 若设 Si 和 O 的原子半径为 0.25nm, 加工的去速率为  $10^{-3} \mu\text{m}/\text{s}$ 。

溅射率与以下因素有关:

#### (一) 离子的质量

一般采用质量较大的氩(Ar)、氪(Kr)或氙(Xe)离子。图 1-30 给出了用氩(相对原子质量为 131), 氪(相对原子质量为 84)和氙(相对原子质量为 40)三种离子对熔融石英进行抛光时, 能量与溅射率之间的关系<sup>[1.16]</sup>。

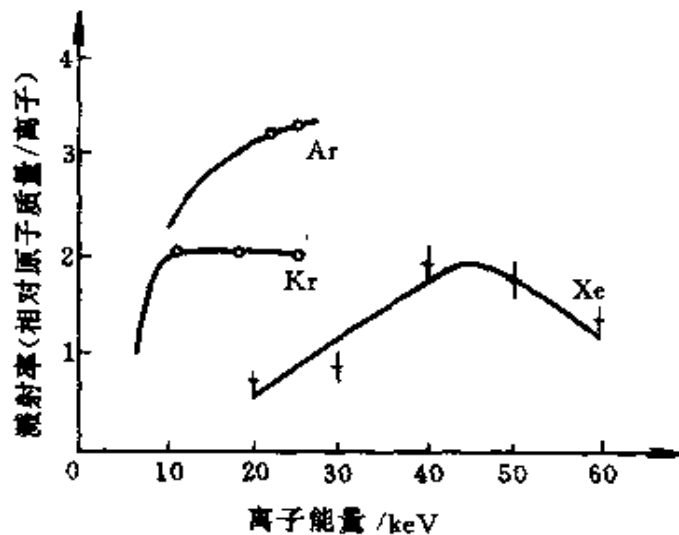


图 1-30 不同离子时熔融石英的溅射率

#### (二) 离子束的入射角

溅射率随入射角(离子束与溅射表面组成的角度)增大而增大,如图 1-31 所示<sup>[1.17]</sup>。垂直入射时溅射率最高,但粗糙度最大。所以要根据要求选用合适的入射角。

#### (三) 离子束的电流密度

离子束的电流密度增大,溅射率也增大。

#### (四) 离子束的能量

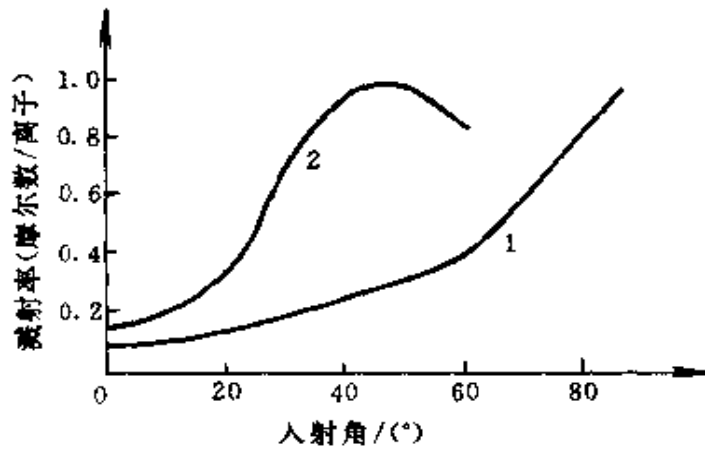


图 1-31 溅射率与入射角的关系

1—用 50keV 氦离子轰击石英;2—用 200eV 汞离子轰击铝。

离子束的能量以加速电压(eV)来表示。溅射率与离子束能量的关系因加工材料的不同而不全相同。

加工熔融石英时溅射率和离子能量之间的关系如图 1-32,图 1-33 和图 1-34 所示<sup>[1.18]</sup>。

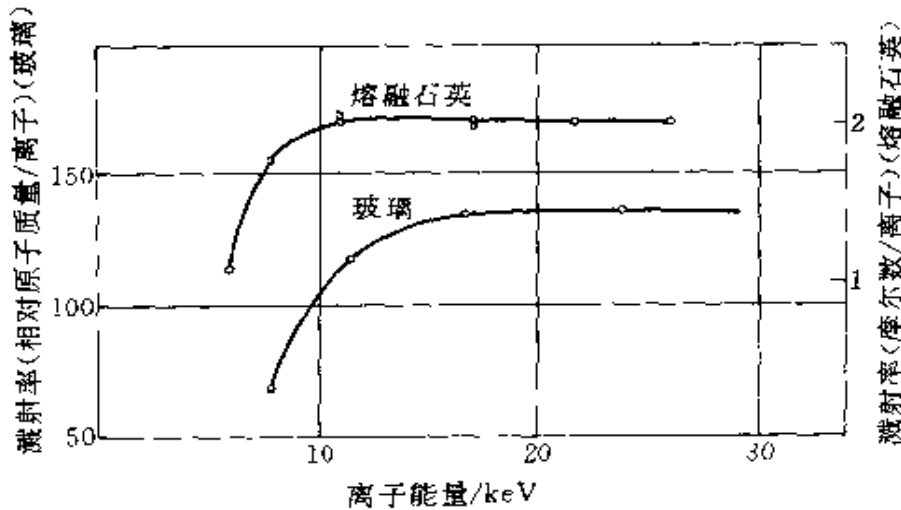


图 1-32 溅射率随氦离子能量的变化

由图可知溅射率会在某一离子能量时出现饱和现象而呈现最大值。例如,氦离子的能量在 15keV 时溅射率最大;而氙离子在能量为 40keV 时溅射率约为 1.8,是最大值。

除以上因素外,溅射率还随工件的材料而变化。材料越硬,溅射率越小。

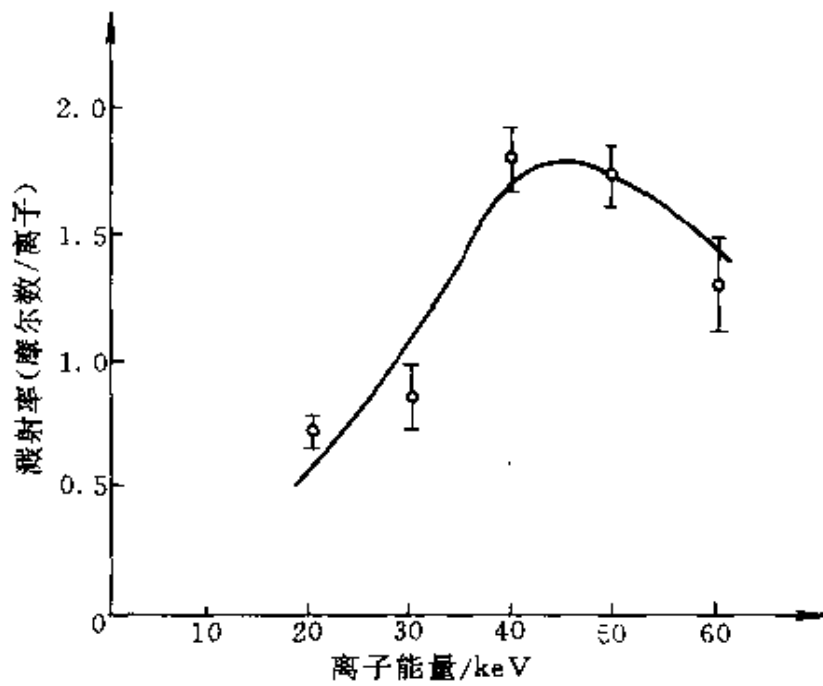


图 1-33 溅射率(熔融石英)随氩离子能量的变化

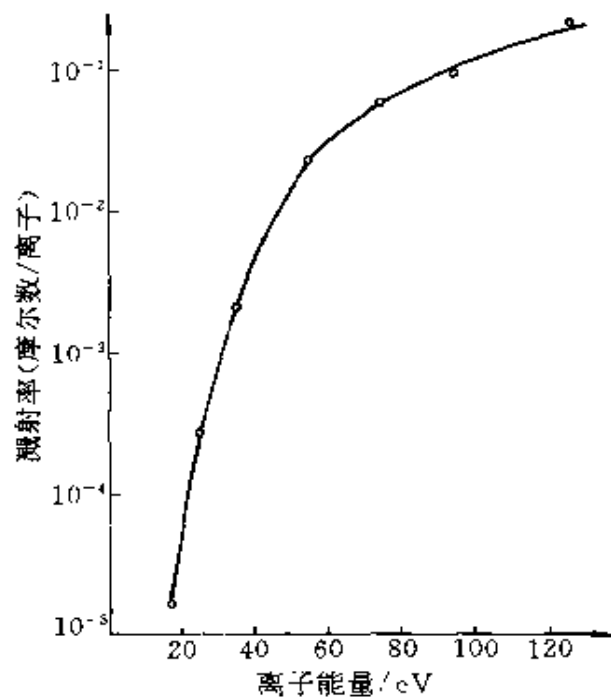


图 1-34 溅射率随氩离子能量的变化

## 二、溅蚀深度

在离子能量一定时,溅蚀深度不仅和溅射率有关,而且和工件的温度以及离子束的入射角有关。例如,用 12keV 的氩离子束垂



直入射熔融石英表面,当工件温度为  $100^{\circ}\text{C}$  时,溅蚀深度约为  $1\mu\text{m}$ ;当工件温度为  $600^{\circ}\text{C}$  时,约为  $4\mu\text{m}$ ,如图 1-35 所示。当入射角增大时,溅蚀深度也会变深,如图 1-36 所示<sup>[1.18]</sup>。

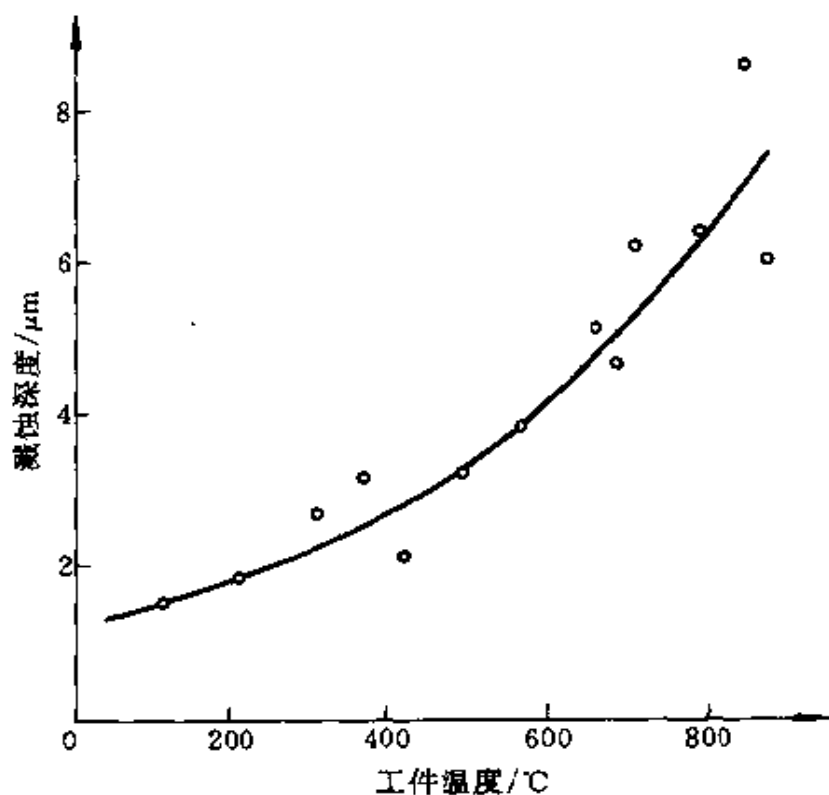


图 1-35 溅蚀深度和工件温度的关系(12keV)

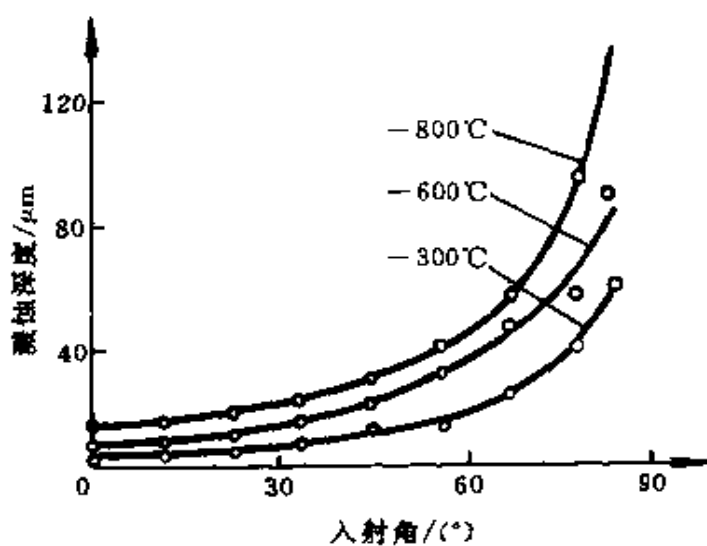


图 1-36 溅蚀深度和入射角的关系(12keV)

用电子散斑法估计,在 1keV 时,离子穿透的深度大约是 5nm。

### 1.4.3 离子抛光的效果

#### 一、溅射表面的结构和性质

研究发现,在溅射后的硼硅玻璃表面层中有不同的结构形态出现。被试验的玻璃先经过热处理,使其分离成两种不同成分的玻璃态:SiO<sub>2</sub> 和 B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>。用 8~10keV 的氦离子 Ne<sup>+</sup> 轰击放在真空度为 6.65Pa 的真空室内加热到温度为 500~700°C 的玻璃表面。结果发现,被轰击过的表面去除了大量的硼和钠,也去除了一部分氧,而表面硅的成分相对地增大了。用 X 射线粉末衍射图分析发现,其表面结构相当于 α-石英的六方晶系。

用电子显微镜对由 72% 的 SiO<sub>2</sub> 和其它成分,如 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Na<sub>2</sub>O, CaO 和 MgO 组成的玻璃表面进行研究。其表面用 4keV 的空气离子在真空度为 13.3Pa 的真空室内轰击。短时间轰击后,仅仅发现表面变得清洁,并没有任何形态的变化。经过一小时或更长时间的轰击后,表面具有全新的形态并出现了沟槽,其形态取决于入射角的大小。

在掠射时(和表面法线的夹角等于或大于 80°时),其沟槽与离子束的入射方向相平行,如图 1-37 所示<sup>[1.18]</sup>。

当入射角增大时,沟槽变得与离子束的方向垂直,如图 1-38 和图 1-39 所示<sup>[1.18]</sup>。

#### 二、加工变质层和残余应力

用高能量的正离子抛光的光学玻璃表面,划痕比普通方法抛光的表面要少,但用离子抛光会使表面产生加工变质层和残余应力。在被加工的表层中会有离子的注入和引起折射率的变化。

用直径为 2mm,电流为 5mA,47keV 的氦离子束轰击钠玻璃时,根据折射率的变化而测出的变质层大约为 0.1μm。加工变质层中有残余应力存在。表 1-5 是用 4μA/cm<sup>2</sup> 的氦离子和氩离子分别轰击低膨胀系数玻璃 Cer-Vit 和 ULE 时的残余应力<sup>[1.17]</sup>。

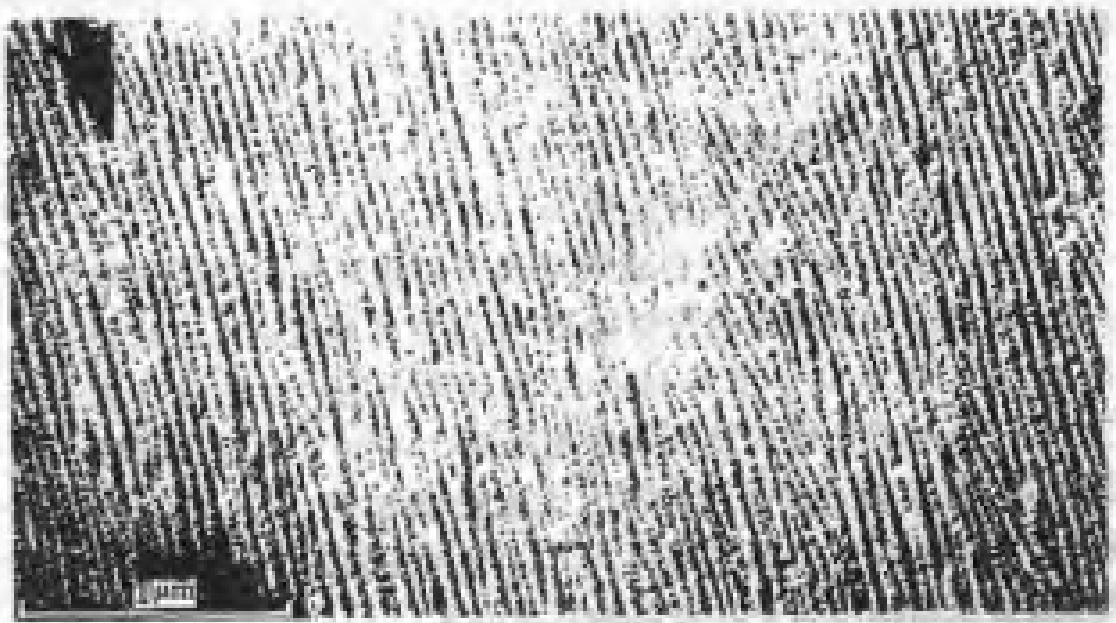


图 1-37 掠射时离子轰击后的玻璃表面(4keV, 轰击 6h,  
箭头指示离子束入射方向)

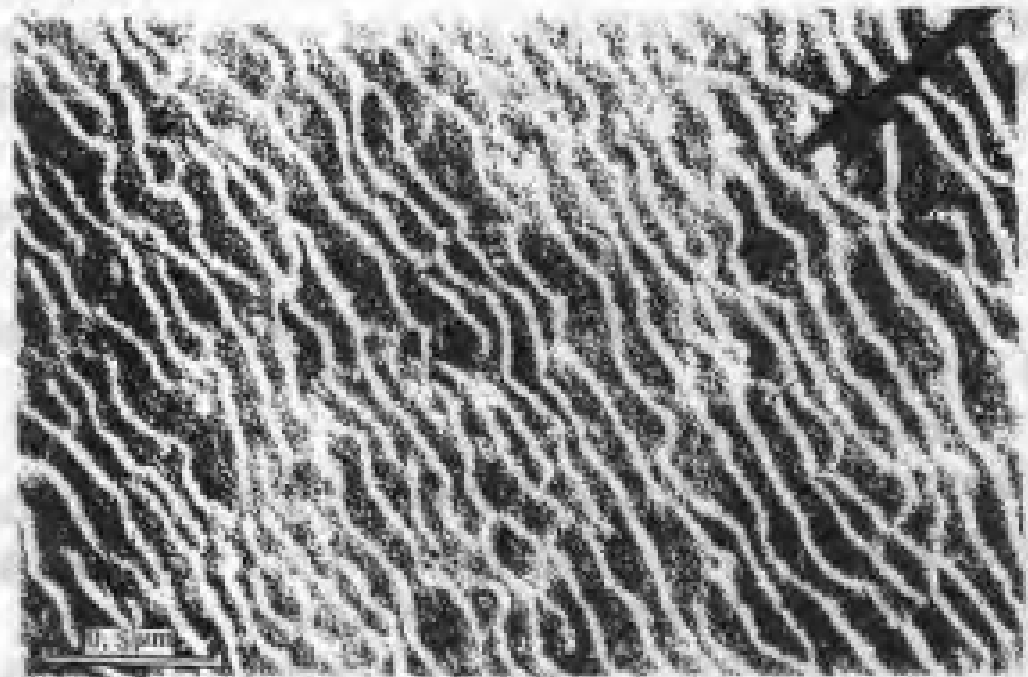


图 1-38 60°入射时离子轰击后的玻璃表面(4keV, 轰击 2h,  
箭头指示离子束方向, 沟槽间距平均为 120nm)

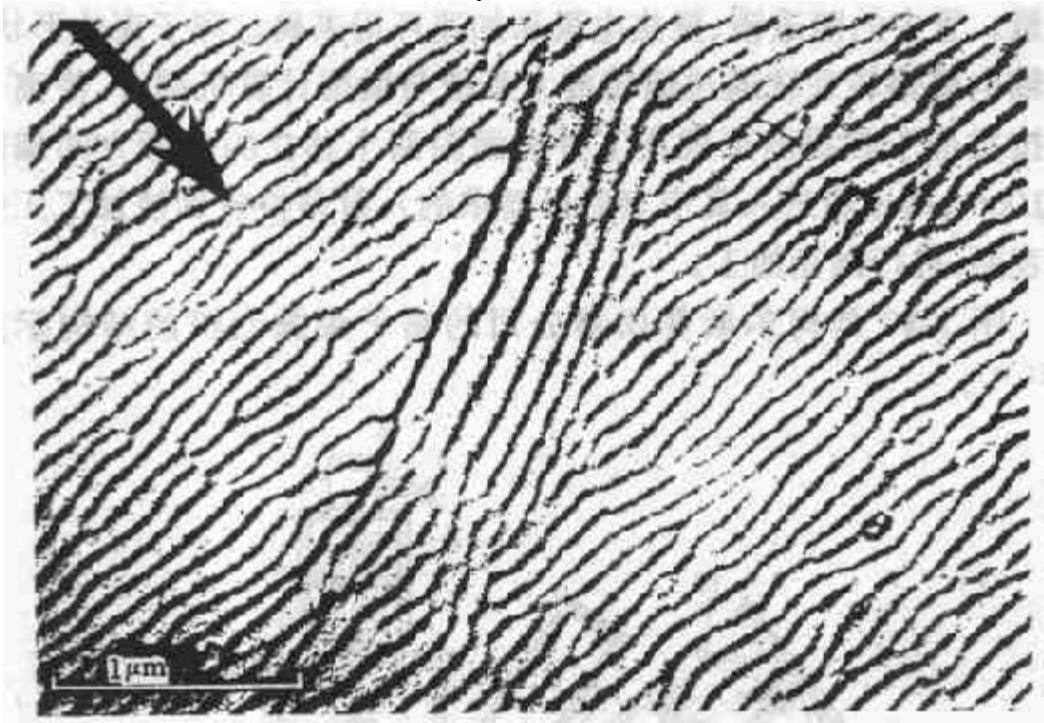


图 1-39 45°入射时的情况,沟槽非常规则并垂直于离子束,间距为 80nm

表 1-5 残余应力

材 料	轰击离子	残余应力/(N/m <sup>2</sup> )
Cer-Vit	50keV Xe <sup>+</sup>	<9.6×10 <sup>7</sup>
ULE	150keV Ar <sup>+</sup>	≈2×10 <sup>7</sup>

此外,加工时真空系统中的真空油蒸气由于被电子或高能量的离子所轰击会聚集到低蒸气压的固体表面,对表层产生污染。

#### 1.4.4 离子抛光机的结构

离子抛光机由离子束发生器、加速管、偏转装置和真空室等部分所组成。离子束发生器是一个射频离子源,它由一个耦合在调谐射频线路上的等离子瓶组成。离子源工作时,在射频场中的电子获得能量并产生振荡,然后按其轨道使气体的原子电离。由于等离子瓶后端充有正电荷,正离子被迫从出口管冲出去,在出口管处形成等离子区。出口管四周由密封的空间电荷所围绕,它将离子从等离子区吸出,进入加速管。在加速管中离子经多级加速面获得较高的

能量。管中的隙透镜、聚焦电极和加速环用来确定离子束的形状。双轴电磁偏转系统通过偏转放大系统与微型计算机耦合,使离子束按类似于扫描的形式在工件表面沿两个独立的坐标方向偏转 $\pm 10\text{cm}$ 。离子束进入真空室后以要求的入射角投射到被加工工件的表面,进行抛光加工。

图 1-40 是柯尔斯曼仪器公司的离子束抛光机的结构示意图<sup>[1.19]</sup>。

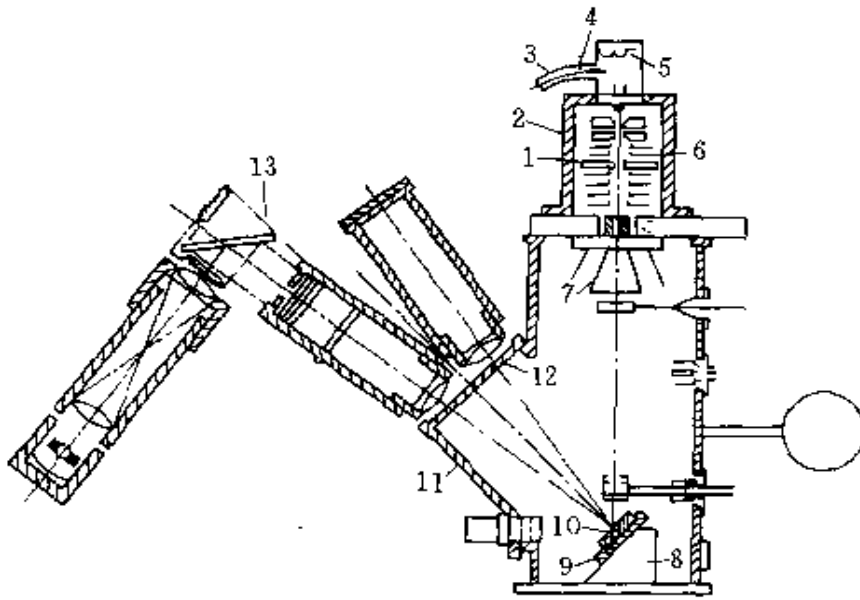


图 1-40 离子束抛光机结构示意图

- 1—静电透镜;2—离子束发生器;3—输气管道;4—阀门;  
5—灯丝;6—聚焦和加速装置;7—偏转板;8—驱动机构;  
9—夹具;10—工件;11—工作室;12—窗口;13—干涉仪。

离子束发生器 2 固定在机床的顶部,它由输入氩气的管道 3、阀门 4、灯丝 5 和具有聚焦与加速功能的装置 6 所组成。氩气进入离子发生器后,在射频电场的作用下电离成带正电荷的离子。进入加速装置后在加速电压(一般在 12 万伏以下)的作用下,离子获得一定的能量。静电透镜 1 使离子束聚焦。离子束直径一般为 1~5mm。静电偏转板 7 可使离子束作两个方向的偏转运动,实现对工件的扫描。

控制装置可通过改变电子透镜、离子引出装置和加速器的电

压实现离子束的动态聚焦,以便使离子束的电流密度保持不变,并使它总在被加工零件的表面聚焦。

干涉仪 13 通过窗口 12 监控工件表面的加工质量。

在工作室 11 中,被加工零件 10 安装在夹具 9 中。夹具安装在驱动机构 8 的表面,夹具可以改变倾斜角度,以改变离子束入射到工件表面的入射角。工件由可以无级变速的直流电机驱动。

在工件表面可以产生连续的螺旋线、同心圆或电视扫描等不同类型的加工轨迹。

#### 1.4.5 离子抛光非球面零件的工艺流程

用计算机以数学形式来表示光学表面的面形时可以用表面斜率来表示,也就是说可以用单位表面面积的矩阵同表面上某一基准点的相对高度来表示。

离子抛光就是要控制离子束,使其从固体表面每个单位面积上精密地去除不同数量的材料。为了使所去除的材料量随位置不同而不同,离子束聚焦点的大小应该和计算机运算时所用的最小单位面积的直径相一致。从一个确定单位面积所去除的材料量应通过控制入射到那部分面积上的离子总量来实现。在加工过程中,离子种类、离子能量及离子束入射角都须按所要求的值保持不变。

离子抛光的工艺流程如图 1-41 所示<sup>[1,19]</sup>。可以分六个步骤:

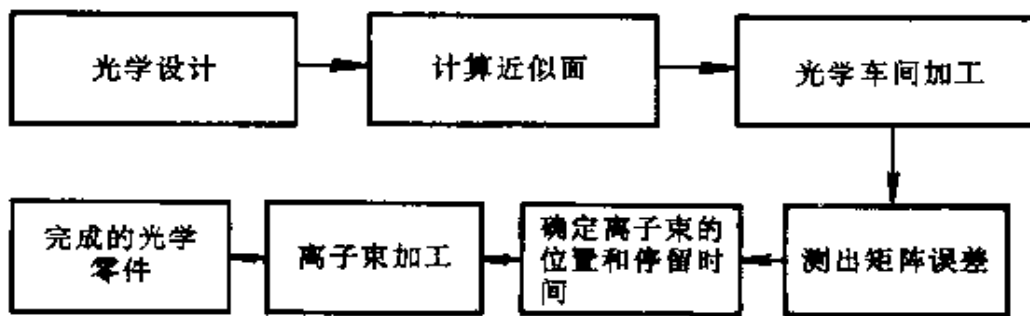


图 1-41 离子抛光的工艺流程

步骤 1——光学设计人员用光学设计程序把所要求的光学表面以精密的数学形式表示出来。

步骤 2——根据所得到的数学形式,用计算机求出与此表面最接近的球面或抛物面。

步骤 3——用普通的研磨抛光方法加工出最接近的球面或抛物面,以便减少离子束抛光所需的时间。对大多数非球面来说,这一最接近表面与最终所要求的表面之差的最大值仅在几微米左右。表面可以用激光干涉仪精确测量其面形。

步骤 4——将干涉仪测得的表面面形的数据与用数学形式表达的精密光学表面形状进行比较。通过计算机处理,得到表面误差矩阵。这个矩阵确定了从每一单位面积上应去除的材料数量。

步骤 5——把表面误差矩阵数据送入微型计算机,然后它驱动离子束作两个坐标方向的扫描运动。计算机直接和离子束系统连接,经放大并控制离子束在光学表面上的位置和停留时间。此外,计算机在操作过程中,用来监视离子束,并对离子束参数的微小变化进行校正。离子束在光学表面某一面积上停留的时间同步骤 4 确定的那个面积上应去除的材料量成正比。

步骤 6——把经过加工成最接近球面的光学零件放入真空度约为  $1.33 \times 10^{-3} \sim 1 \times 10^{-4} \text{Pa}$  的真空靶室内,在计算机的控制下,用离子束轰击工件表面使其达到所需的面形。由于材料去除的精度很高,因此有可能在完全开环下直接获得所要求的面形。也就是说,从成型加工的开始到结束,不必进行多次的面形测量。

#### 1.4.6 加工实例

由于离子抛光去除的玻璃厚度很小,一般只有几个微米,所以只能用来加工小型零件和偏离平面或球面的非球面度较小的非球面零件。一般情况下,离子抛光的表面形状精度可达  $0.1 \mu\text{m}$ ,表面粗糙度可达  $0.01 \mu\text{m}$ 。

美国某公司用氩离子束加工一块相对孔径为 1:6,直径为 10cm 的抛物面反射镜,材料是硼硅玻璃。预先将毛坯抛光成最接近球面,其球面半径为 120cm。用直径为 3mm 的聚焦离子束在球面上沿螺旋线轨迹进行轰击。离子束在各带区停留的时间由计算

机控制,以达到预定的去除量。当离子束电流为  $100\mu\text{A}$  时,轰击 11h 后玻璃所去除的厚度为 4~5 个波长。

用离子束轰击的方法不仅能抛光玻璃零件,而且还可以加工其它非金属或金属零件。例如可以用它来抛光高能量激光器谐振腔的金属反射镜。

如果利用干涉仪进行监控,离子束抛光非球面的过程就可以完全自动化。

### 参 考 文 献

1. 1 Heynacher E. Production and testing of aspheric surface. Proceedings of SPIE, 1983. 381:41
1. 2 Horne D F. Optical Production Technology. London: Adam Hilger Ltd. 1972. 295~296
1. 3 Jones R A. Trends in computer-controlled Polishing. A digest of technical papers presented at the Workshop on Optical Fabrication and Testing, California. 1982. TuA5-2
1. 4 Xin Qiming. Linearity of Removal in the Process of Optical Element Polishing. Journal of Beijing Institute of Technology, 1992, 1(2):123~127
1. 5 Xin Qiming. A computer controlled polishing machine. Journal of Beijing Institute of Technology, 1994. 3(2)
1. 6 Aspden R, et al. Computer Assisted Optical Surfacing. Applied Optics, 1972. 11 (12):2742
1. 7 井川直哉. 超精密切削加工用工具. 光技術コンタクト, 1989. 27(3):174
1. 8 Decker D L, et al. Preselection of diamond single-point tools. Proceedings of SPIE, 508:135
1. 9 西村一仁. 工具形状及切削刃加工. 光技術コンタクト, 1989. 27(5):299~300
1. 10 辛企明. 光学零件金刚石车削. 光学技术, 1987(4):25~30
1. 11 Akira Kobayashi. Ultra-precision machining of Plastics. Proceedings of SPIE. 508:32
1. 12 Lambrecht C R. Aspheric optical manufacturing. Proceedings of SPIE, 1978. 159:48
1. 13 堤正臣. 機械構造. 光技術コンタクト, 1988. 26(9):666~667
1. 14 平船健治等. プラスチックの超精密切削. 光技術コンタクト, 1987. 25(9):



1. 15 Sanger G M. Improving optical fabrication. *Laser Focus/Electro-optical*, Jan. 1984. 68
1. 16 谷口紀男, イオンビームによる非球面レンズのポリシ加工(Ⅰ). *光技術コンタクト*, 1971. 9(4):26~31
1. 17 谷口紀男, イオンビームによる非球面レンズのポリシ加工(Ⅱ). *光技術コンタクト*, 1971. 9(5):23~28
1. 18 Wilson R G. Ionic Polishing of Fused silica and Glass. Technical Report 36 of Optical Science, The University of Arizona
1. 19 郑开陵, 离子束抛光技术. *现代兵器*, 1982 年第九期 21~25

## 第二章 光学零件精密模压成型技术

过去,模压成型技术主要是用来给光学零件的研磨抛光加工提供毛坯或制造一些低精度的光学塑料透镜。但是,随着模具材料、模具制造技术和精密模压工艺的发展以及现在可以不经过熔融状态而采用溶胶-凝胶法来制造高纯度的玻璃,因此,精密的光学零件,特别是非球面光学零件和其他一些难以加工的特殊形状的零件,有可能用模压成型的方法直接制成,而不需要再进行任何的研磨和抛光,从而能大批量生产。并且可以同时压制出一些参考平面作为装配时的基准,从而大大减少装配和校准的时间和工作量。

这种无材料去除的加工方法对光学零件的制造业来说是一次革命。非球面光学零件的精密模压成型是 80 年代初才用于生产的高新技术,它还在不断的发展和提高,成品零件的精度也在不断的改进。

### 2.1 光学塑料零件的模压成型技术

#### 2.1.1 概述

目前全世界每年要生产出数百万件非球面塑料透镜,用作自动变焦相机的目镜、取景器和聚光镜等。在军事上也广泛地用于各种微光夜视镜,光电制导炮弹的导引头和激光测距装置中。

##### 一、几种主要的光学塑料

在光学系统或其他场合中使用的光学塑料主要有以下五种:

(一)聚甲基丙烯酸甲酯(Polymethyl Methacrylate,简称 PM-

MA,也称 Acrylic)

它是最重要、用途最广的热塑性光学塑料。它也是所有光学塑料中最硬、抗划伤能力最好、机械强度最高的一种。因此,光学塑料透镜有 80%以上是用它来制造的。

它很容易模压成型,稳定性好。但因导热性差,所以必须用润滑剂来散热。

PMMA 的折射率  $n_d = 1.491$ ,它的色散系数  $\nu_d = 57.2$ ,是“冕”类光学塑料。

PMMA 的热膨胀系数比玻璃大 8 到 10 倍。举例来说,当温度从 27℃ 升到 65℃ 时,直径为 25mm 的透镜将增大 0.0762mm。若焦距为 50mm,在这温度范围内焦距仅增加 0.2mm。总的说来,PMMA 从高温冷却时的光学记忆,即元件恢复到它原来的尺寸的性能,要比玻璃好。

它的透光率很高,大约是 92%。引起失透的内散射也很小,它可以透紫外光而且不易老化。

(二)聚苯乙烯(Polystyrene,简称 PS,也称 Styrene)

这是“火石”类光学塑料,尽管它的抗紫外辐射性能和抗划伤能力都不如 PMMA,但是这种材料的折射率高, $n_c = 1.590$ ,阿贝数小, $\nu_d = 30.8$ ,所以当它和 PMMA 组合时可以成为对 F 和 C 谱线进行校正的消色差透镜,二级光谱的校正一般比玻璃的消色差透镜还要更好一些。它的透过率为 88%,稍低于 PMMA。它很容易注射成型,稳定性好。但在近紫外光照射下,它的透过性能是不稳定的。

(三)聚碳酸酯(Polycarbonate,简称 PC)

它是一种耐冲击强度非常好的非常坚韧的光学塑料。虽然这对精密光学零件来说并不很重要,但对路灯、建筑警告灯和汽车尾灯来说是非常有用的。加入紫外稳定剂后,这些在户外使用的 PC,其可见光透过率仅损失 5%。

它的另一个主要优点是在很宽的温度范围内(从 -135℃ 到 150℃)都具有良好的性能。例如,加热到 104℃ 时,线性尺寸仅增

加 0.07%。

由于它具有很高的延展性,所以不易机械加工,只能用注射成型的方法。但是它的成型性能和抗划伤性能都不如 PS 和 PMMA,价格也比它们高。但它有较高的折射率, $n_d=1.586$  和较小的阿贝数, $\nu_d=34.0$ ,所以光学常数和聚苯乙烯相似,可以用来校正色差。

#### (四) 苯乙烯和丙烯酸酯的共聚物(简称 NAS)

NAS 是由 70% 的苯乙烯和 30% 的丙烯酸酯共聚产生。折射率  $n_d$  可以从 1.533 到 1.567 之间变化。它的热形变温度与 PMMA 相近,抗划伤能力比 PC 要好一些。它已经被用作能校正色差的第三种材料。但 NAS 一般只用来做薄透镜。

#### (五) 烯丙基二甘醇碳酸酯 (Allyl diglycol carbonate, 简称 CR-39)

它是目前唯一在光学领域中使用的热固性塑料。这种材料通常是浇注到玻璃模具中以后在严格的温度控制条件下固化成型。CR-39 的透过率很高,耐磨,抗冲击和抗化学腐蚀的能力强。它能经受持续的 100℃ 的高温,短时间内能耐 150℃ 而性能没有明显的降低。由于它的收缩率很大(在固化时的收缩率高达 14%),限制了它的应用领域,目前主要用于眼镜片。

### 二、光学塑料零件的优缺点

产品设计师之所以采用越来越多的光学塑料零件,特别是非球面零件,主要有两大原因:价格比较低和有可能制造出几何形状独特的光学零件。

比起玻璃零件而言,光学塑料零件有很多优点。首先是成本低,抗冲击强度高,重量小。其次是成型方便。光学塑料可以用压铸、注射等方式将材料成型成不需再加工的光学零件,从而可以制造形状和结构较复杂和特殊的零件,如非球面、菲涅尔透镜等。还可以将安装定位面、镜框等与零件同时成型,减少装配的工作量。

光学塑料零件的主要缺点是经不住很大的温度变化和表面容易划伤。但大多数光学系统的工作环境温度变化并不很大,所以不

会有很大的影响。在塑料表面镀耐磨膜层可以改善抗划伤性能。

光学塑料,特别是 PMMA 的吸湿性会严重影响光学系统的焦距。虽然不能全部消除其影响,但可以根据实验和经验从设计上加以改善。

为了提高光学塑料透镜在环境变化时其光学性能的稳定性,各国都在研制新型的光学塑料。例如,日本为了制造高记录密度光盘读出头的物镜,研制了几种热稳定性好、饱和吸水率低的光学塑料<sup>[2.1]</sup>。在表 2-1 中将它们的主要性能和 PMMA 作了比较。

表 2-1 几种新光学塑料和 PMMA 的性能比较

名称	折射率	阿贝数	热变形温度/ ℃	吸水率/ (%)	硬度比较 (PMMA 为 1)	制造厂
PMMA	1.491	57	100(75)*	2.0	1	
OZ-1000	1.500	57	103(80)	1.2	0.6	日立
TE 301	1.512	46	122(100)	1.8	0.8	三菱
WF-100	1.497	56	104(80)	1.2	0.6	三菱
ARTON	1.510	56	160(120)	0.5	1	日本合成胶公司

\* 括弧内的温度是像差起变化的温度。

用 ARTON 制造的非球面物镜,经长时间的加热,其波差变化很小,如图 2-1 所示。

### 三、光学塑料零件的成型方法

(一)注射成型 它是将预先加热熔化的塑料以高压高速注入温度受控制的模具中成型。这种方法广泛地用于热塑性塑料零件的大批量生产。

(二)热压成型 这种方法是将粉料或片料放入预热的模具中加热加压使其成型。由于每次成型时,模具要重新加热,所以加工周期较长,一般要 5~20min。通常这种方法可加工出比光波波长还小的细节部分。主要用于菲涅尔透镜或透镜阵列的加工。

(三)铸造成型 它是将塑料单体或经部分聚合的流动状态的塑料加入适量的引发剂后浇入模具内,使其在一定温度和常压下聚合成型。一般用于热固性塑料的成型。模具通常用玻璃制作。固

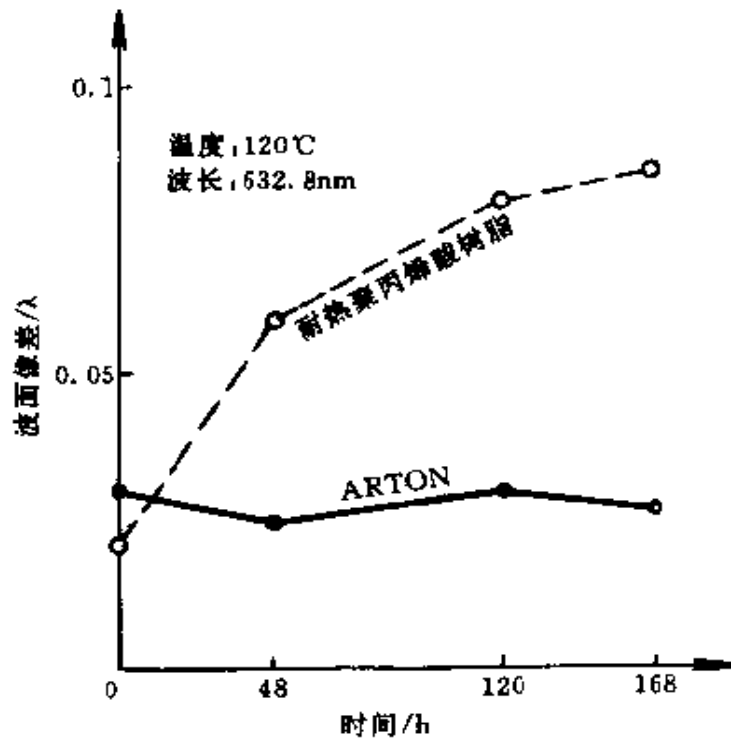


图 2-1 ARTON 塑料加热时物镜波差的变化

化过程必须有严格的温度控制,以避免引起应力和变形。由于不可能使冷却过程中产生的收缩得到充分地控制和补偿,所以不能获得面形很精确的零件,例如 CR-39 眼镜片就是用这种方法制造的,其固化收缩率可达 14% 以上。

绝大多数高质量的非球面光学零件都是用热塑性塑料制造的,因此我们仅仅介绍热塑性塑料的注射成型技术。

## 2.1.2 光学塑料的主要物理特性

### 一、光学特性

图 2-2 示出了可模压成型光学零件的光学塑料在玻璃图上的位置<sup>[2.2]</sup>。这些塑料目前有商品出售,并且有较好的光学质量。其中最主要的是 PMMA, PS 和 PC。CR-39 和 O1PS 是用铸造法成型的热固性塑料。还有一些光学级的热固性塑料,如环氧树脂、硅树脂、氨基甲酸乙酯和交联的聚甲基丙烯酸甲酯等,虽然很少用来成

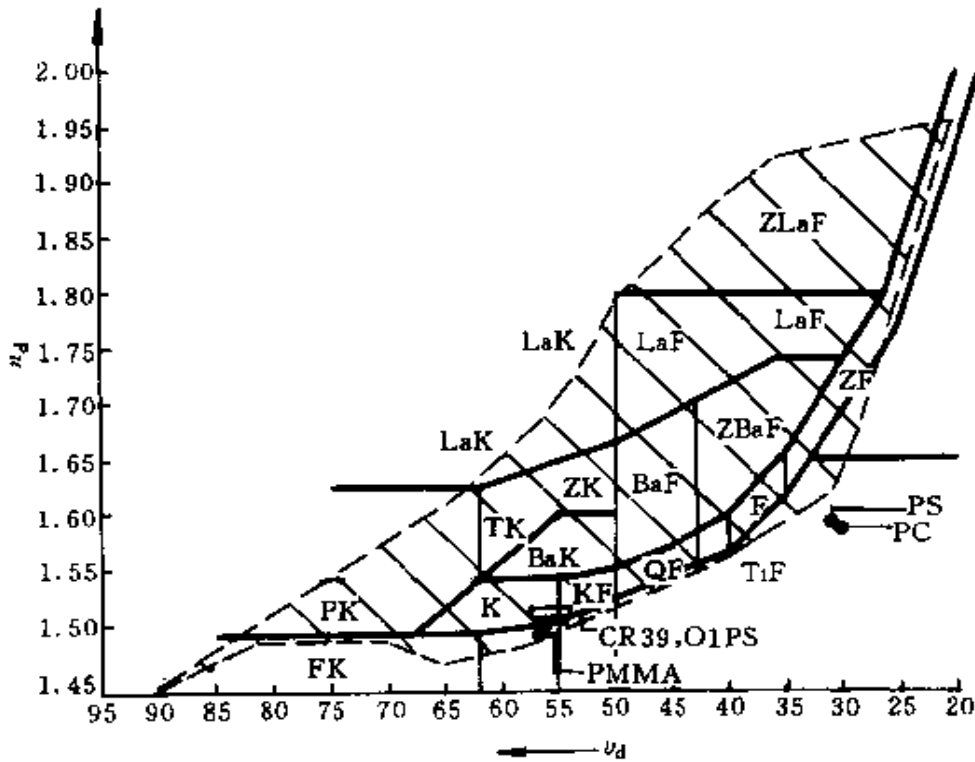


图 2-2 光学塑料的光学常数

型光学零件,但可以在复制法中用作使基体表面非球面化的附加材料。

表 2-2 对光学玻璃和光学塑料的光学特性进行了比较<sup>[2,2]</sup>。

表 2-2 光学特性比较

	光学玻璃	光学塑料
折射率 $n_d$	1.44~1.95	1.49~1.61
色散系数 $v_d$	20~90	26~57
折射率的稳定性	$\pm 10^{-4}$	$\pm 5 \times 10^{-4}$
折射率漂移(注射成型)	—	$10^{-3}$
折射率的均匀性	$\leq 10^{-5}$	$\leq 5 \times 10^{-4}$
光压常数/ $\text{Pa}^{-1}$	$\leq 6 \times 10^{-12}$	$\leq 35 \times 10^{-12}$
应力折射率系数/ $\text{Pa}^{-1}$	$\leq 3 \times 10^{-12}$	$\leq 40 \times 10^{-12}$
折射率温度系数 $\frac{dn}{dt}/\text{C}^{-1}$	$(-10 \sim +10) \times 10^{-6}$	$(-100 \sim -160) \times 10^{-6}$

可以保证塑料颗粒原料的折射率和光学玻璃一样的稳定程度,但注射成型过程中一般都会产生折射率的漂移和双折射。另外,光学塑料的折射率温度系数很大,例如 PMMA 的  $dn/dt$  大约是 K9 玻璃的 30 倍,而且和玻璃的符号相反。因此折射率随温度的变化必须得到补偿。

## 二、其它物理特性

除了光学特性外,塑料光学零件的设计者和制造者还必须考虑其它的物理特性。表 2-3 是光学塑料和光学玻璃其它物理特性的比较<sup>[2, 2]</sup>。

表 2-3 其它物理特性比较

特 性	光 学 玻 璃	光 学 塑 料
密度/(g/cm <sup>3</sup> )	2.3~6.2	1.05~1.32
弹性模量/(N/mm <sup>2</sup> )	(50~80)×10 <sup>3</sup>	(2~4)×10 <sup>3</sup>
硬度/(N/mm <sup>2</sup> )	(3~7)×10 <sup>5</sup>	120~190
热膨胀/K <sup>-1</sup>	(5~10)×10 <sup>-6</sup>	(70~100)×10 <sup>-6</sup>
热稳定性/K	910~1030	360~420
热导率/Wm <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>	0.5~1.4	0.14~0.23
比热容/(Jkg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )×10 <sup>3</sup>	0.3~0.8	1.2~1.4

表 2-4 给出了四种主要光学塑料物理特性的数值。在计算模具尺寸的收缩率时,除了要知道膨胀系数和材料固化收缩率以外,导热系数、比热和密度的精确数值也是非常重要的。

表 2-4 光学塑料的物理特性

性 能	单 位	PMMA	PS	PC	NAS
折射率 $N_d$ $N_f$ $N_c(20^\circ\text{C})$		1.491	1.590	1.586	1.564
		1.497	1.604	1.593	1.574
		1.489	1.584	1.576	1.558
阿贝数 $\nu_d$		57.2	30.8	34.0	35
折射率温度系数 $dn/dt$	×10 <sup>-5</sup> /°C	-12.5	-12.0	-14.3	-14.0
混浊度	%	<2	<3	<3.0	<3
透过率(厚度 3.175mm)	%	92	87~92	85~91	90
临界角 $i_c$	(°)	42.1	39	39.1	39.8



(续)

性能	单位	PMMA	PS	PC	NAS
变形温度					
2°C/min 182×10 <sup>4</sup> Pa	°C	92	82	137.7	
2°C/min 45×10 <sup>4</sup> Pa		101	110	132	100
线膨胀系数	×10 <sup>-5</sup> /°C	7	6~8	6	6~8
一般零件连续工作的最高温度	°C	79.4	79.4	115.5	79.4
吸水性(在 23°C 下浸泡 24h)	%	0.3	0.2	0.15	0.15
密度	kg/m <sup>3</sup> ×10 <sup>-3</sup>	1.19	1.06	1.2	1.09
硬度		M97	M90	M70	M75
冲击强度	N·m/m <sup>2</sup> ×10 <sup>-3</sup>	23.7(无缺口) 3(缺口)	0.54~0.86 (悬臂缺口)	不断 (无缺口)	0.75~1.1 (悬臂缺口)
绝缘常数					
60Hz		3.7	2.6	2.90	3.40
10 <sup>4</sup> Hz		2.2	2.45	2.88	2.90

另外,温度和湿度对塑料透镜的焦距也有很大的影响。图 2-3

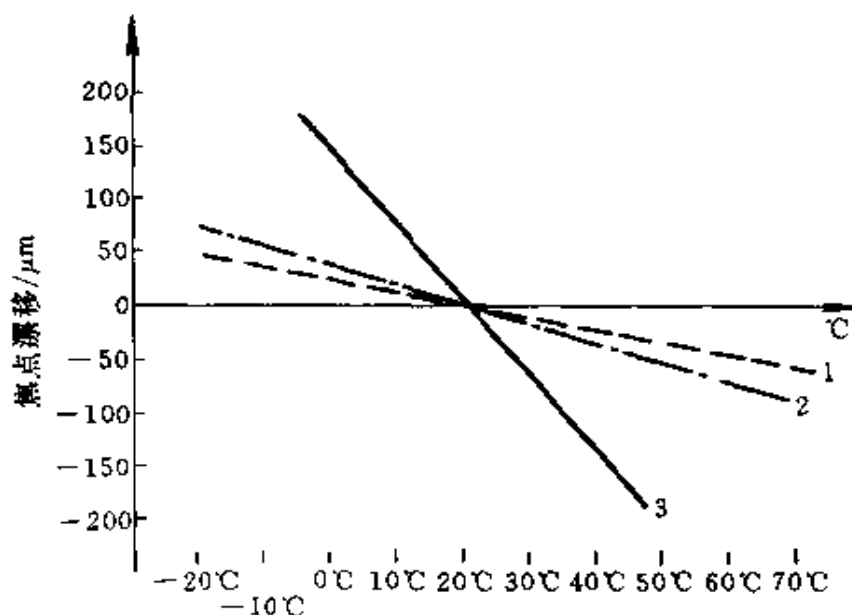


图 2-3 焦点漂移与温度的关系

1—P-P-G, 相对孔径 1:5.75, 焦距 27.09; 2—G-P-P-G-G, 相对孔径 1:2.0, 焦距 26.95; 3—P-P-G, 相对孔径 1:6.3, 焦距 26.65。

给出了三个由塑料(P)和玻璃(G)组成的照相物镜的焦距漂移与温度的关系。

可以看出,只有 1 和 2 这两组可以部分地补偿温度的影响。

图 2-4 给出了由四个零件(PPPG)组成的镜头的吸湿特性。相对湿度从 7%增大到 99%时,其质量的变化( $\Delta m/m$ )大约为 4%。

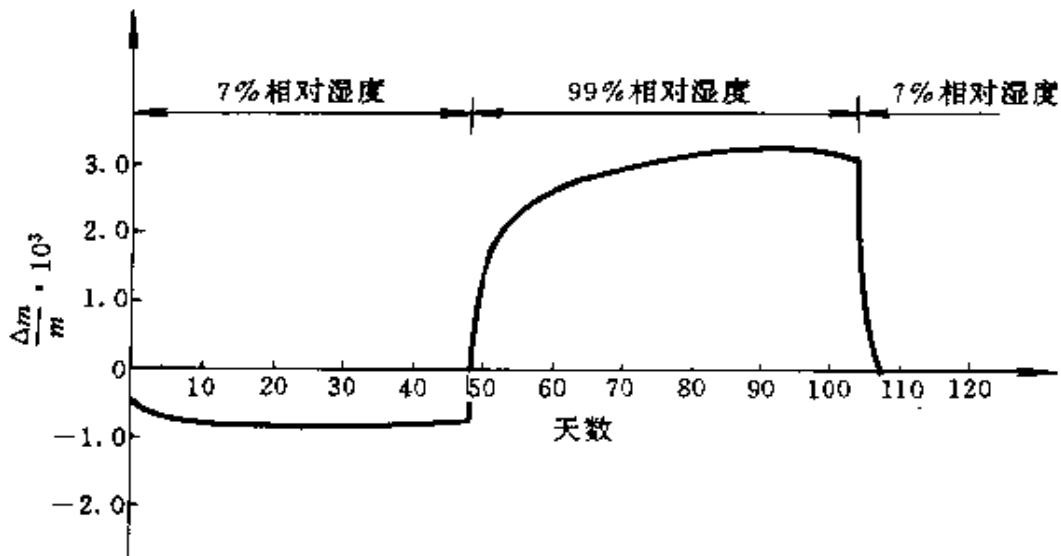


图 2-4 镜头的吸湿特性

图 2-5 给出的是同一个照相机镜组的三个不同的样品的焦距漂移现象,从中看出,吸湿是一个相当慢的过程,而且补偿作用并

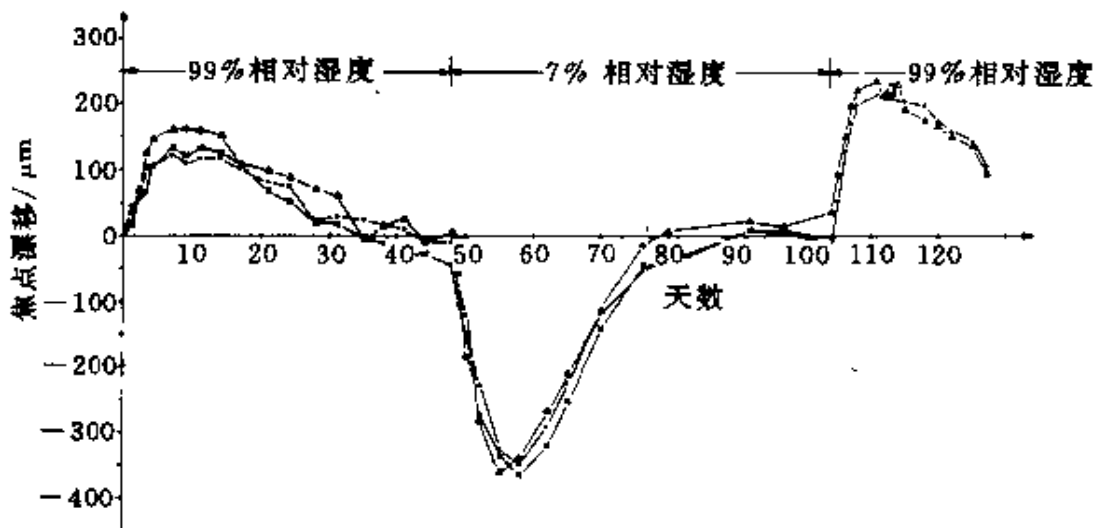


图 2-5 吸湿性引起的焦点漂移

不大。

### 2.1.3 注射成型光学塑料零件的质量

19世纪30年代研究和发展的现代注射成型技术使我们现在有可能用多种塑料非常经济地大量生产高质量的光学透镜及其他光学零件。表2-5列出了注射成型光学零件所能达到的精度<sup>[2,3]</sup>，它分成低、中、高三个等级。

表 2-5 注射成型零件的精度

技术指标	低	中	高
焦距变化	±3%~±5%	±2%~±3%	±0.5%~±1%
曲率半径变化	±3%~±5%	±2%~±3%	±0.5%~±1%
面形(光圈数)	10~30	5~10	2~5
不规则光圈数	3~7	1~3	1/2~1
表面质量(美国军标)	80/50	60/40	40/20
偏心差/(°)	±3	±2	±1
中心厚度公差/mm	±(0.25~0.38)	±(0.10~0.18)	±(0.05~0.08)
直径或长度公差/mm	±(0.25~0.38)	±(0.10~0.18)	±(0.05~0.08)
重复精度	(1~2)%	(0.5~1)%	(0.3~0.5)%

光学塑料零件通常可以达到光学玻璃零件加工后所得到的面形精度，但塑料零件会或多或少的存在不规则光圈。图2-6是用一模五腔(同时成型五个零件)的模具成型后零件的表面光圈<sup>[2,2]</sup>。一般来说，在靠近浇口和边缘的区域不可避免的存在不对称性误差。

注射成型和快速冷却时都会产生应力。不适当的浇口和零件结构中有凸缘部分也会产生应力。聚苯乙烯的应力双折射可高达 $8 \times 10^{-3}$ ，而PMMA大约为 $0.06 \times 10^{-3}$ 。内应力以及由于有序的聚合物分子固化区所造成的双折射与零件的几何形状以及注射、冷却过程的工艺因素有关。如果模具设计正确以及对注射成型阶段进行精心地控制，双折射可能减小到允许的程度。

为了减小塑料收缩时引起的变形，应尽量使零件边缘和中心的厚度接近。如果边缘和中心厚度之比小于2:1，成型质量就比



图 2-6 塑料模压成型表面面形

较容易保证。如果大于或等于 3 : 1 时就显得比较困难,当大于或等于 4 : 1 时,那就很不容易得到合格的成型零件了。

#### 2.1.4 光学塑料注射成型的模具

模具的质量是注射成型技术的关键,模具是整个生产中费钱最多的部分。

模具由可分离的两部分组成<sup>[2-2]</sup>,如图 2-7 所示,它们是喷嘴端(固定)和脱模端(可移动)。每一部分的基模内还有冷却管道、加热器和控制模具温度的热电偶。而零件成型的腔室则由构成零件非光学表面的承座和决定零件光学表面的型芯组成。

模具的材料要兼顾到硬度、抗腐蚀能力和可加工性。通常用不锈钢做基模。型芯的材料一般可用 440C 可硬化的铬不锈钢,也可以用陶瓷或玻璃。目前,越来越多的制造厂商已采用在不锈钢基体上镀非电解镍膜层来构成型芯。这样,不仅可以用单晶金刚石车削的方法使表面精确成型,而且提高了模具的使用寿命。

模具不仅需要经验的设计师进行设计,而且要求制造人员具有光学、精密模压以及检测方面的知识。

当研制的新的透镜或系统有很大风险时,建议以最低的投资

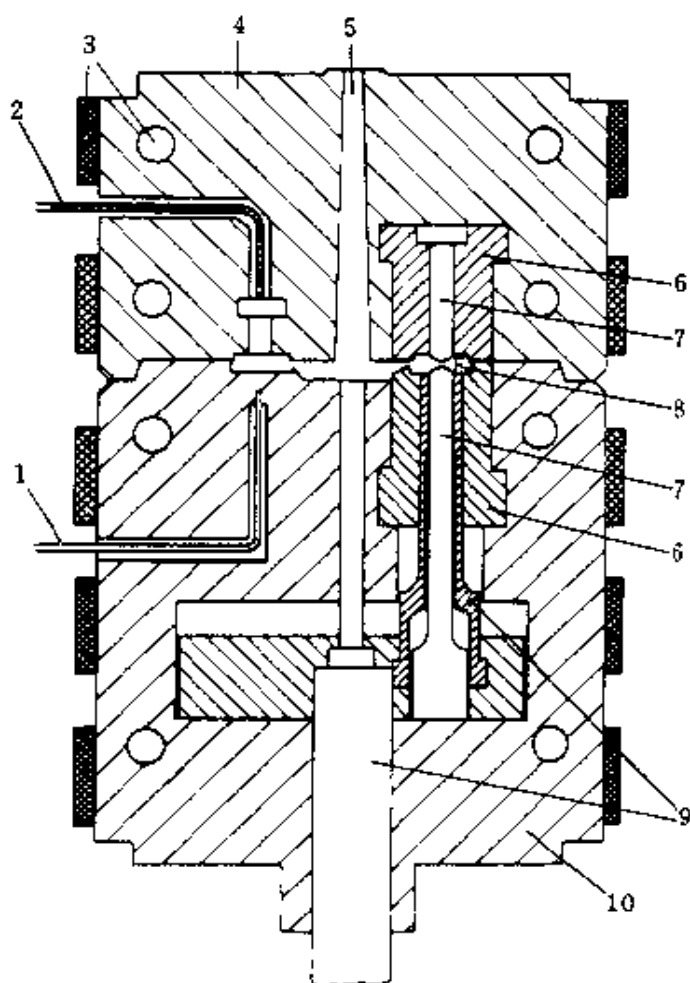


图 2-7 注射成型模具

1—热电偶;2—压力测量计;3—温度控制件;4—喷嘴端;5—浇口;  
6—型腔体;7—型芯;8—透镜腔;9—顶出机构;10—脱模端。

制造一个模具的试制品。这样就可以从技术上验证一下产品的性能，或者还能检查一下市场对新产品的需求程度。

大部分试制模具都采用单腔。通常可以压制几千个零件。为了降低成本，也可以采用较便宜、较软的材料来制造模具和型芯。由于较软的材料易磨损，所以一般可以用它生产几百个零件。

当零件进入大批量生产时，注射成型的模具可以多达 32 个腔。但大多数的生产模具具有 1, 2, 4 或 8 个腔。除非产量非常大，一般不用 12 和 16 腔的模具。超过 32 腔的模具几乎很少使用。一个模具中，腔数越多，它的制造费用就越高，但每个产品零件的成本就越低。腔的数量还受光学质量要求和注塑机的尺寸所限制。

用单腔或腔数少的模具容易压制高质量的塑料非球面零件。塑料的线膨胀系数和固化收缩率是模具设计时保证零件具有正确的光学面形和结构尺寸的最重要的因素。一个直径为 25.4mm, 焦距为 50mm 的丙烯塑料透镜当从 27℃ 加热到 65℃ 时将使它的直径变化 0.0762mm, 焦距则增加 0.2mm。光学塑料零件的收缩量一般为模具尺寸的 0.1%~0.6%, 它随材料和生产工艺的不同而不同。当然其它因素, 如浇口的位置、大小和形状, 注射压力和温度等都是很重要的。为了精确掌握成型过程的变化, 还应采用传感器和电子反馈线路进行在线控制。

型芯的制造一般采用本章第三节(2.3)中所介绍的计算机控制的高精度单晶金刚石车削机床加工成型, 再用人工对表面进一步抛光而成。型芯的表面面形大都采用高精度的三坐标测量装置检测。

模具的寿命随多种因素影响而不同。但是一般认为, 一个价格便宜的模具在重新修正之前应该至少能耐五万个注塑加工周期; 一个高质量的模具至少应该耐 25 万个加工周期。

### 2.1.5 注射过程

光学塑料零件的注射成型过程为:

原料预热干燥→加热塑料, 使它达到一定的粘度→通过喷嘴射入闭合的模腔→冷却固化定型→开模取出成品。

该过程的循环时间, 小零件一般为半分钟, 大零件约为 3~4min。

注射成型零件的质量与很多因素有关, 其中最重要的因素有原料的加热温度、注射速度、注射压力、模具的温度和冷却的时间等。注射过程可以用图 2-8 来说明<sup>[2.2]</sup>。

理想的注射过程应该是将低压下的热塑性材料(图中点 1)以一定的压力注射入模具并使其压缩到一个比较稠密的状态, 以便补偿其收缩(图中点 2), 冷却后的零件在点 3 的温度下脱出模腔, 完全冷却后零件处在点 4 的状态。

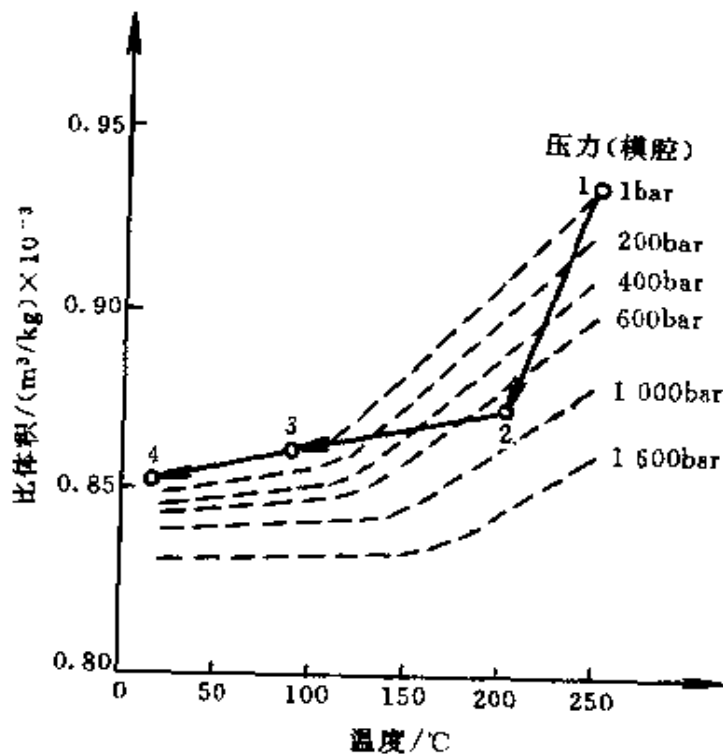


图 2-8 光学塑料注射成型状态图

有很多因素会使零件的注射过程偏离这个理想的过程。例如，当温度较高的原料接触到温度较低的模具时几乎立刻就会形成厚度大约为 0.2mm 的表层。由于塑料的导热性很差，所以此时中心部分仍然是非常热的，因此图 2-8 中的点 2 不能完全地和点 3 有相同的体积。再如，在几百巴的压力下的模腔要比 1bar 压力时大得多，在点 2 和点 3 之间，由于持久的压力会使一部分额外的塑料注入在冷却的表层上，造成了零件外圈材料的不均匀性。

目前注射成型光学塑料零件的尺寸一般限制在直径小于 100mm，中心厚度小于 10mm 的范围内。小零件的加工周期一般为 30s，大零件一般为 3~4min。

### 2.1.6 光学塑料零件表面的镀膜

在零件成型后，其表面一般都要进行镀膜处理。根据需要可以在光学塑料表面获得抗静电膜，耐磨膜，减反膜，宽带多层膜，窄带多层膜，分光膜，滤光膜和反射膜。最常用的是抗静电膜，耐磨膜和减反膜。

与玻璃零件相比,光学塑料零件用真空镀膜的方法镀制膜层时会遇到一些特殊的问题,主要的三个问题及解决办法是:

(1)塑料在抽气和沉积过程中有放气特性。塑料种类不同,放气的速率也不同。即使同一种塑料,其放气特性在每次蒸镀时都可能存在差别,因为放气特性还与零件的制造方法(模压、铸造或抛光),制造或存放时的湿度等因素有关。由于这一特性,使真空室内的剩余气体发生差别,从而使成膜的折射率发生变化。

因此,光学塑料零件表面镀膜时应选用抽气速率更高的真空镀膜设备。

(2)塑料的热膨胀系数大约是玻璃的 10 倍,也就是说,塑料容易产生热变形以致不能进行通常的基体加热处理。这不仅限制了镀层材料的种类,而且还影响膜层的牢固度。

利用离子辅助沉积技术,在蒸镀前先用离子流轰击待镀的表面进行预处理,在沉积过程中用离子束辅助沉积膜层材料,镀膜结束后又用离子束对膜层进行处理,从而可以在室温的基体上获得膜层致密牢固的  $MgF_2$  单层减反膜以及  $SiO_2$ ,  $TiO_2$  和  $Ta_2O_5$  的多层膜。

(3)塑料易带静电。塑料表面阻抗大,摩擦后易产生静电。因此,塑料零件从模具内取出时就带有静电,吸引空气中的灰尘附着在其表面。

因此,必须用电离的空气或放电处理予以中和。可以采用浸渍的方法涂上有机硅溶液,从而在表面形成导电性好、有效作用时间长的抗静电膜层,同时该膜层还具有很好的耐磨性能。

## 2.2 光学玻璃的模压成型技术

### 2.2.1 概述

通过 40 年的努力,美国柯达公司在 70 年代研究成功玻璃的精密模压成型技术(FLM),一次就完成光学球面或非球面的零件加工,不需要用研磨抛光的加工方法。并在 1982 年首次在 35mm



照相机中用了两片两精密压型制造的非球面玻璃透镜,在世界上引起了很大的震动。80年代日本大力开展了光学玻璃的精密压型。从发表的专利数量、文献内容的广度和深度来看,在此项技术领域中国日本已是后来居上。

模压成型的玻璃非球面透镜已应用在照相机、电视摄像机、光导纤维微透镜等产品上,但模压成型的玻璃球面透镜或其他零件还不多。不过随着模压技术的进一步发展,成本的进一步降低,有可能会逐步取代目前的传统的冷加工方法。

玻璃精密模压成型可分为二次压型和直接压型。二次压型还有两种方法:一是先做成重量和表面质量达到一定要求的预成型件,然后加热软化进行压型;二是把表面质量好的光学玻璃棒料端部加热软化,然后依次挤压成型。二次压型方法的玻璃材料利用率低,耗能大,但适合于多品种小批量生产。

直接压型是将熔炉中的玻璃液直接压成光学零件。这种方法提高了玻璃材料的利用率,减少了能源消耗,但由于冷却过程中的收缩使这种方法难以获得高精度的产品。而且,由于玻璃温度高,使模具内表面的损耗比较严重,缩短了模具的使用寿命。因此目前较多采用多次成型,即通过1~2次预压型后使熔融玻璃的温度降低,最后在较低的温度下进行终压型。

模压零件的玻璃材料一般都是软化温度较低的玻璃。美国康宁公司为此还研制了一种专用的玻璃,牌号为C0550,它在激光二极管的整个光谱区域内有极高的透过率,它的主要性能如表2-6所示。

表 2-6 C0550 的主要性能

折射率	$n_d=1.60500, n_c=1.60141, n_F=1.61341, n_e=1.60786$
色散系数	$\nu_d=50.40, \nu_e=50.12$
密度/(g/cm <sup>3</sup> )	3.80
线膨胀系数/ °C <sup>-1</sup> (+20~300°C)	$150 \times 10^{-7}$
转变温度 $T_g/^\circ\text{C}$	330

### 2.2.2 模压成型玻璃零件的质量

玻璃精密模压成型是一种正在不断发展的新技术。以国际上80年代末的情况来看,其质量水平如表2-7所示。

表 2-7 玻璃模压成型的质量

质量指标名称	低成本	高成本
直径	最大 25mm 最小 4mm 公差±0.1mm	最大 50mm 最小 2mm 公差±0.01mm
中心厚度	最大 10mm 最小 $\begin{cases} \text{负透镜 } 0.4\text{mm} \\ \text{正透镜 } 0.3\text{mm} \end{cases}$ 公差±0.03mm	最大 25mm 最小 0.3mm 公差±0.01mm
曲率半径(最接近球面)	5mm	2mm
面形	球面 $N = \lambda/10$ $\Delta N = \lambda/30$ 非球面 3-1-1- $\frac{1}{2}$ *	非球面 2- $\frac{1}{2}$ - $\frac{1}{2}$ - $\frac{1}{4}$
表面疵病	80-50**	40-20 或 20-10
面倾角	10'	5'
最大非球面度	250 $\lambda$	500 $\lambda$
非球面表面斜率	50 $\lambda/\text{mm}$	180 $\lambda/\text{mm}$
* 这四位数字分别表示:面形精度——不规则光圈数——整个孔径的不规则度——中部带区的不规则度 ** 美国军用标准		

另外,模压成型玻璃零件的折射率可控制在 $\pm 5 \times 10^{-4}$ ,折射率的均匀性可优于 $5 \times 10^{-6}$ ,应力双折射可优于 $0.01\lambda/\text{cm}$ 。

### 2.2.3 基本工艺过程

玻璃精密模压的工艺过程随制造厂家而不同,一般来说有以下步骤:

(1)制备玻璃预成型件。目前一般是要求抛光成球面的零件。

(2)加热玻璃预成型件和模具到要求的温度,使玻璃的粘度达到  $10^7 \sim 10^{12} \text{Pa} \cdot \text{s}$ 。模压成型室要抽真空或注入氢、或氮、或惰性气体以防止零部件的高温氧化。

(3)把加热好的预成型件放入模腔,给模具一定的压力,使模腔内软化了的玻璃坯料变形。

(4)停止加热,使模具在载荷不变的条件下降温。当玻璃温度低于转变温度后去除载荷。

(5)继续降温至  $300^\circ\text{C}$  以下,开模取出成型零件。

(6)玻璃成型件退火,提高折射率的均匀程度和改善内应力。

#### 2.2.4 压型工艺条件

工艺条件主要是指压型时玻璃和模具的温度、压力和作用时间。可分小粘度下压型、大粘度下压型和多次压型三种方法。

##### 一、小粘度下压型

例如美国专利<sup>[2.4]</sup>中提出,将待成型的玻璃块放入模具中一起加热到玻璃粘度为  $10^{6.6} \text{Pa} \cdot \text{s}$  左右时压型,保压 1~5 分钟,直到玻璃温度降到应变点以下。又如日本松下公司提出<sup>[2.5]</sup>,把成分为  $\text{PbO}70\%$ ,  $\text{SiO}_2 27\%$ , 其他 3% 的玻璃加热到  $500^\circ\text{C}$ , 用  $3922660 \text{Pa}$  的压力压型,保压 2 分钟,等玻璃降至  $300^\circ\text{C}$  时脱模。

用这种方法,模具的温度较高,模具与玻璃接触的时间长,容易损坏模具的表面;又由于玻璃的粘度较低,易进入模套缝隙而形成飞边,容易引起炸纹和破损。另外由于压型时间长,模具利用率低,降低了生产效率。

##### 二、大粘度下压型

在大粘度下压型,玻璃和模具的温度都较低,有利于延长模具表面的寿命。也可以使玻璃和模具的温度尽量接近,实现等温条件,从而使玻璃收缩均匀,提高成型精度。

但由于粘度大,可塑性差,因此待压型玻璃块的形状尺寸要尽量接近成品。

康宁公司提出<sup>[2.6]</sup>,把玻璃块放入模具中升温到  $650^\circ\text{C}$ ,此时

玻璃的粘度为  $5 \times 10^7 \text{Pa} \cdot \text{s}$ , 用  $8.8 \times 10^8 \text{Pa}$  的压力压型, 保压 2min, 待玻璃冷却至  $538^\circ\text{C}$ , 粘度为  $10^{12} \text{Pa} \cdot \text{s}$  时脱模。

### 三、多次压型

为了解决在大粘度下压型时玻璃可塑性差, 变形量小, 需要长时间压型的问题, 目前多数专利中提出采用多次压型的方案, 即玻璃在低粘度下先通过预成型或再通过中间成型使玻璃粘度逐渐增大, 在其形状尺寸接近成品时进行最终成型。在进行预成型和中间成型时, 玻璃温度可高于模具温度, 但最终成型时玻璃和模具的温度应接近, 温差一般小于  $20^\circ\text{C}$ , 实现等温压型。

例如保谷公司提出<sup>[2.7]</sup>, 把预热到粘度为  $10^5 \sim 10^{7.5} \text{Pa} \cdot \text{s}$  的玻璃放入加热到玻璃转变温度以上的模具中, 用  $9.8 \times 10^6 \text{Pa}$  的压力进行预成型, 当玻璃粘度为  $10^6 \sim 10^{10} \text{Pa} \cdot \text{s}$  时用高压进行等温最终压型, 最终压型的变形量只有数微米到一百微米。也可以分三步进行, 即在  $10^5 \sim 10^{6.8} \text{Pa} \cdot \text{s}$  时进行预成型, 在  $10^{6.5} \sim 10^8 \text{Pa} \cdot \text{s}$  时进行中间成型, 在  $10^{7.5} \sim 10^{10} \text{Pa} \cdot \text{s}$  时进行最终成型。

## 2.2.5 模压成型用的模具

模具是决定成型零件质量优劣的关键因素。模压成型技术的发展实际上主要是决定于模具材料及模具制造技术的进步。

### 一、对模具的要求

光学玻璃模压成型对模具的要求是:

- (1) 在高温时具有很好的刚性、耐机械冲击强度和足够的硬度;
- (2) 在反复地和快速地加热冷却的热冲击下模具不产生裂纹和变形;
- (3) 高温时模具成型表面与光学玻璃不产生化学反应, 不粘附玻璃;
- (4) 不发生高温氧化;
- (5) 加工性能好, 易加工成高精度和高表面光整程度的型面;
- (6) 成本低。

## 二、模具材料

金属本是制造模具的传统材料。最初曾用不锈钢或耐热合金等金属做模具的本体,但因为这些金属材料有随着热循环增加会使晶粒长大,表面变粗糙,易氧化和易与玻璃粘连等缺点,所以目前已主要使用非金属材料来做模具。下面介绍几种主要的模具材料。

### (一)玻璃碳

关于模具材料,有大量的专利。70年代的一些专利提出了用玻璃碳来制做模具<sup>[2.2.2.8,2.9]</sup>。玻璃碳由有机聚合物热分解方法制备,它的化学性质不活泼,各向异性,无晶格或粒子界面,容易抛光成镜面,不与高温状态的玻璃起化学反应,不粘附玻璃。但要在惰性或还原气氛下使用,以防氧化。

### (二)碳化硅或氮化硅

随着技术的进步发现玻璃碳并不是理想的模具材料。因为玻璃碳除了容易氧化外,还有弹性模量低,抗折和耐冲击强度低,导热系数小和表面易划伤等缺点。因此,柯达公司在1977年提出使用碳化硅(SiC)和氮化硅(Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>)作为模具材料<sup>[2.10]</sup>。这种材料的优点是在高温时与玻璃的化学反应小,不渗透气体、水蒸气和液体,不粘附玻璃,抗氧化,改善了高温下的抗弯和冲击强度,提高了表面硬度,有较高的导热系数。其缺点是表面硬度大,所以难于加工成高精度的光滑表面。

碳化硅或氮化硅的制备方法有:①热压烧结法制备细晶粒的碳化硅或氮化硅;②离子溅射法沉积成大块材料或在基体上沉积一定厚度的膜层;③用化学汽相沉积法制备成大块材料或在基体上沉积一定厚度的膜层。

(三)用超硬合金或金属陶瓷作为基体,在其压型面镀有贵金属合金膜层

由于仅用一种材料制造模具很难全面达到模具的各项要求,因此目前国际上通常的做法是在模具基体的压型面上附着一层薄膜,使模具既有足够的强度又具有表面质量高、抗氧化、对玻璃化

学活性小、离型性能好和使用寿命长等优点。最常用的是在超硬合金或金属陶瓷的基体上镀贵金属合金膜层。

模具基体材料主要有以下几种：

- (1)以碳化钨(WC)作为主要成分的超硬合金；
- (2)以碳化铬( $\text{Cr}_3\text{C}_2$ )作为主要成分的金属陶瓷；
- (3)以氧化铝( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )为主要成分的金属陶瓷。

贵金属和贵金属合金膜层材料有：

- (1)铂(Pt)合金；
- (2)纯铱(Ir)或铱合金；
- (3)纯钌(Ru)或钌合金。

这些膜层材料是用溅射法镀制在已经用电火花加工或用金刚石切削和抛光加工的模具基体球面上的。制作非球面透镜的模具时,镀层要比较厚( $50\mu\text{m}$ 左右),然后再用单点金刚石精密车床车削成非球面面形和进行必要的后续抛光。

## 2.2.6 模压成型的设备

### 一、设备的组成

根据作业方式不同有各种结构形式的成型设备,但一般都包括以下七个重要组成部分。

(1)模具的开合系统。用气动、液压或机械的方式打开和闭合模具,以便放入玻璃预成型件和取出完工零件。

(2)成型室。由透明的玻璃外罩或有透明窗口的金属外罩的密闭空间提供真空空间或充惰性气体的空间。既要便于模具的进出又要能保证惰性气体的进出。

(3)模具组及其固定装置。

(4)对模具加压的动力源和传动机构。

(5)对模具和玻璃预成型件的加热装置和温度控制系统。加热方法一般采用电阻加热、感应加热或激光加热<sup>[2-11]</sup>。采用热电偶、光学测高温计或其它温控装置进行温控。

(6)抽真空系统、惰性气体注入和排出系统。

(7)过程控制及显示系统。

## 二、东芝公司的模压设备

日本东芝公司生产了一种 MO-2C 型玻璃精密模压装置。

这种模压成型装置的特点是：

- (1)具有高精度的成型机构；
- (2)高速加热，快速冷却；
- (3)精确的温度控制；
- (4)对成型温度和时间进行监控；
- (5)成型条件的重复性好；
- (6)容易实现压型条件的设定和变更。

该装置的主要性能如表 2-8 所示。

表 2-8 MO-2C 的主要性能

性 能	
模具外径	
φ64mm	
行程	装卸时
	70mm
	维修时
	115mm
最大模腔压力	
12000N	
模型压力控制范围	
0~12000N	
加压速度控制范围	
0~20mm/s	
机械精度的重复性	
斜度小于 30°	
升温速度	
70s 内使模具外表面达 800℃	

## 2.3 溶胶—凝胶法玻璃的成型技术

### 2.3.1 用溶胶—凝胶法制造玻璃

过去，玻璃都是用高温熔融体急冷的方法制造的。但是最近已可以采用溶胶—凝胶法(Sol-gel 法)，不经过熔融状态来制造玻璃。用溶胶—凝胶法制造玻璃的过程如图 2-9 所示<sup>[2, 12]</sup>。

溶胶—凝胶法的初始原料主要是以  $M(OR)_n$  的一般式表示

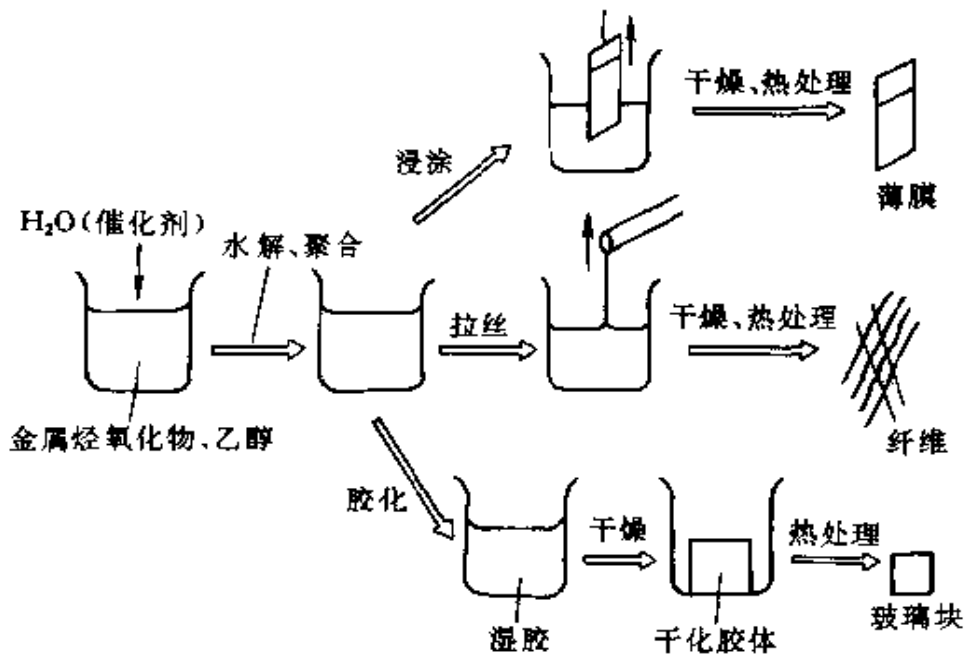
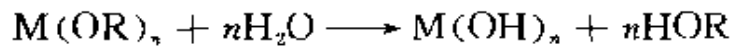


图 2-9 用溶胶 凝胶法制造玻璃过程示意图

的金属烷氧化物。其中,  $M$  代表  $Si, B, Ti, Zr, Al$  等金属;  $R$  代表  $CH_3, C_2H_5$  等烷基;  $n$  为金属的氧化数。

首先调制金属烷氧化物  $M(OR)_n$  的乙醇溶液, 然后加水起水解作用。对于像  $Si$  这样的烷氧化物, 由于化学安定性好, 所以有必要用能促进加水分解的盐酸或氨水作触媒。而对于像  $Zr$  或  $Al$  这样的非常容易水解的烷氧化物也不能直接将水加入溶液, 但在利用空气中的水分时又需要非常稳定的水解条件。金属烷氧化物加水分解的速度因金属的种类不同有很大的差异。

将水加入金属烷氧化物的乙醇溶液时产生水解和缩聚反应, 生成具有  $M-O-M$  结合的无机聚合物。加水分解反应为:



缩聚反应为:



上面的方程只能表示反应的大概情况, 实际的反应机理是很复杂的, 随金属烷氧化物的种类和反应条件而异。当无机聚合物的聚合度较低时, 它能均匀地分散在聚合物溶液中, 称之为溶液。随



着反应的进行,聚合度进一步增加,溶液的粘度也增加而失去流动性,即达到胶化形成凝胶。要是在初始溶液中是两种以上的金属氢氧化物的混合物,同时加水分解和聚合就能制造多成分系的氧化物胶体。

此时,凝胶内含有大量的溶媒或水,所以称为湿胶。将它干燥时,溶媒和水蒸发,生成多孔性的胶。再将干燥后的胶进行高温处理,残存的细孔就会消失而得到致密的玻璃。

### 2.3.2 零件的成型和高温处理

#### 一、零件的成型

溶胶—凝胶法成型光学零件的过程如图 2-10 所示<sup>[2, 13]</sup>。

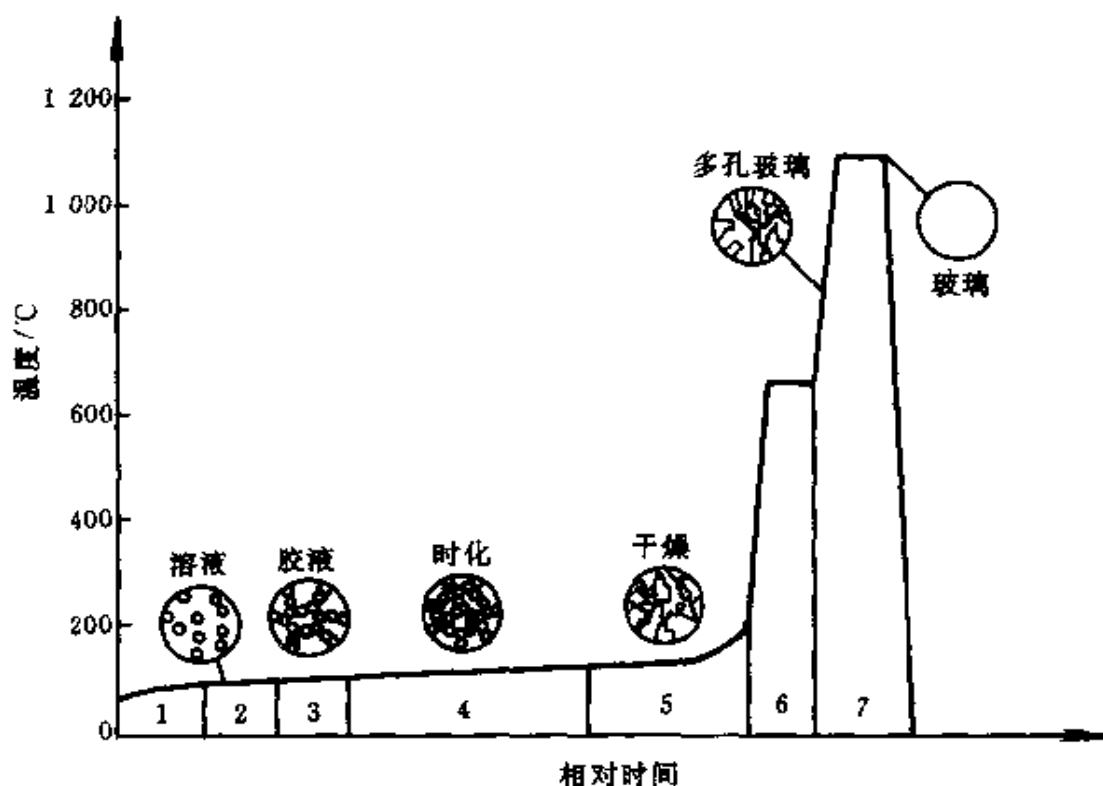


图 2-10 溶胶—凝胶法成型光学零件的过程

1—混合;2—浇铸;3—胶化;4—时化;

5—干燥;6—部分稠化;7—稠化。

将溶液混合后注入模腔,经水解和缩聚后形成未来玻璃所具有的三维网架结构,生成的溶胶逐渐变稠而形成凝胶,接着保留在

模腔内进行固化。固化后从模腔中取出,再进一步干燥以消除在形成胶体时空隙中保存的水分。最后,干燥的胶体要进行高温处理,使多孔的固体变成均匀一致的具有精确面形和光滑表面的光学零件,不需再作任何加工。

## 二、高温处理

多孔性的胶体一定要通过高温处理使其致密化。致密化所必需的最终热处理温度要比熔融体急冷法制造玻璃时的温度低得多。例如石英玻璃用熔融法制造时需要加热到 2200℃ 以上的高温,而溶胶—凝胶法在 1100℃ 时进行热处理就可以得到致密的玻璃。所以,溶胶—凝胶法也被称为“低温合成法”。

经过固化、干燥和致密化后,胶体的收缩系数可达到 2.5。也就是说,假如尺寸为 10mm 的光学零件,则模腔的尺寸必需设计为 25mm。但因为这个过程是可以控制的,而且三维空间内是相同的收缩,所以这次收缩是有益的。因为它可以使生产的微型光学元件的表面特征比加工模具时留在模具表面的特征还要小;而且使零件表面由于模具表面的缺陷和加工印记而形成的缺陷在尺寸上得到减小,从而改善溶胶—凝胶法光学零件的表面粗糙度。

模具可以用精密研磨、金刚石车削和光电刻蚀的方法制造。

用这种方法可以制造各种形状的零件,例如非球面透镜、柱面透镜、特殊曲率半径的透镜、带“把”的透镜、棱镜、棒透镜、锥体反射镜等;还可以制造菲涅尔透镜、闪耀光栅和具有亚微米精度的二元光学元件。美国 Geltech 公司用这种方法生产纯度非常高的石英玻璃零件( $\text{SiO}_2$  含量达 100%)。其性能如表 2-9 所示。

表 2-9 溶胶—凝胶法制造石英玻璃零件的性能

波长范围	0.2~3.2 $\mu\text{m}$	努普硬度	520kg/mm <sup>2</sup> (载荷 300g)
膨胀系数	$0.52 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$	均匀性	低于 $3 \times 10^{-6}$
密度	2.2g/cm <sup>3</sup>	应力双折射	小于 0.1nm/cm
阿贝数 $n_d$	67.6		

## 参 考 文 献

- 2.1 荒井則一. プラスチック非球面レンズ. 光技術コンタクト, 1994, 32(8):15
- 2.2 Greis U, Kirchhof G. Injection molding of plastic optics. Proceedings of SPIE, 1983, 381:69~75
- 2.3 Wolpert H D. A close look at optical plastics. Photonics Spectra, 1983, March: 63
- 2.4 Angle M A, et al. Method for Molding Glass Lenses. Int. Cl. C 03B 9/14. USA, Patent, 3 833 347. 1973. 3. 12
- 2.5 高松敏男. マグネロン. Int. Cl. HolJ 23/40. 日本, 公開特許公報, 昭 62-246230. 1986. 4. 18
- 2.6 長谷川隆, 鈴木清. フロントコーティング方式レコードプレーヤ. Int. Cl. G11B 17/04. 日本, 公開特許公報, 昭 61-32263. 1984. 7. 23
- 2.7 泉谷徹郎, 広田慎一郎. プレスレンズ, 製造方法. Int. Cl. C03B 11/08. 日本, 公開特許公報, 昭 60-118639. 1983. 11. 29
- 2.8 Angle M A, et al. Method and Apparatus for Transfer Molding Glass Lenses. Int. Cl. C03B 7/00, 9/14. US, Patent, 3 844 755. 1972. 11. 16
- 2.9 Parsons W F, et al. Method and Apparatus for Molding Glass Lenses. Int. Cl. A41C, C03B 9/14. US, Patent, 3 900 328. 1973. 3. 12
- 2.10 Blair G E. et al. Method of Molding Glass Elements and Element Made. Int. Cl. C03B 11/08. US, Patent, 4 139 677. 1975. 9. 2
- 2.11 クラウス ハイニッツ. エンジンの潤滑装置. Int. Cl. FOIM 1/18. 日本, 公開特許公報, 昭 61-46407. 1984. 8. 10
- 2.12 峠登, 南努. 玻璃基板的微細加工. 光技術コンタクト, 1988, 26(5):43~49
- 2.13 Nogues J R, Hunt P B. Sol-gel methods can yield complex, economical optics. Laser Focus World, 1995, December: 91

## 第三章 超光滑表面加工技术

超光滑(super smooth)表面是指粗糙度非常小或表面晶格结构完好,无缺陷的表面。

现代光学技术对光学零件及光电零件的表面提出越来越高的信息要求,主要有以下三个因素:

(1)高能量激光器的发展和应用,要求谐振腔反射镜表面非常光滑,以尽可能地减少散射的损失和提高光学零件的激光破坏阈值。

(2)随着光学仪器的使用波段范围向紫外和 x 光延伸,对光学表面粗糙度的要求也越来越高。由于表面粗糙面造成的光线的散射损失与波长的四次方成反比,所以,如果表面粗糙度的均方根值为  $1\sim 2\text{nm}$ ,对于白光或波长为  $632.8\text{nm}$  的激光来说,该表面是“非常光滑”了,但对于 x 光(波长为  $0.8\text{nm}$ )来说则是“太粗糙”了。

(3)在制造光电零件时要求被加工表面具有物理的完整性。如集成电路用的硅片和 CCD 的基片,其表面必须加工成很精确、晶格结构完整无损的,而且是不受化学污染的表面。同样在激光零件、晶体和陶瓷振荡器等的加工中,也需要这样的超精细表面。

一般说来,机械加工的生产效率高,加工精度也好,但这种方法会使被加工材料表面产生塑性变形层、引入或加剧晶体的位错;而化学加工或电化学加工可以产生没有变形层的精细表面,但不能改进几何精度。因此必须研究一种既能改进几何精度又不损坏材料原有性能的新方法。

### 3.1 超光滑表面的加工机理

长期以来一直使用弹性材料或沥青作为模层材料把持硬度比加工材料还硬的细磨料进行抛光加工。在这种情况下,细磨料和工件的每个接触点上的负荷非常小,抛光中产生的碎片也非常小,所以表面没有看得见的擦痕。但是大多数抛光表面在用诺马斯基(Normarski)干涉仪和电子显微镜观察时可以看到无数的擦痕。从机械的观点来看,抛光是研磨的继续,所以表面层有微小的破碎和塑性变形。如果减小抛光中产生的碎片,机械加工就可以变得像化学加工一样地从抛光表面以原子或分子的尺度去除材料。这时,其去除过程应该由被加工材料的表面层的状况所决定,而不是由本体材料的性能决定。

从热力学的观点来看,固体最稳定的状态是绝对零度(0K)时的无缺陷晶体。在此状态下内能最小,而且所有原子间的结合能相等。固体的活泼程度及其它许多特性与它们的晶格构造的缺陷程度有密切的关系。

图 3-1 表示一个由单元素原子和空穴组成的表面层横截面的简单模型<sup>[3.1]</sup>。数字表示这些原子的配位数。表面原子的边界能可以认为是与最靠近的原子数量成比例。从该图我们可以知道不同表面处的原子有不同的边界能。表面上原子的结合能要比材料本体内原子弱一些,因为后者的配位数大于前者。

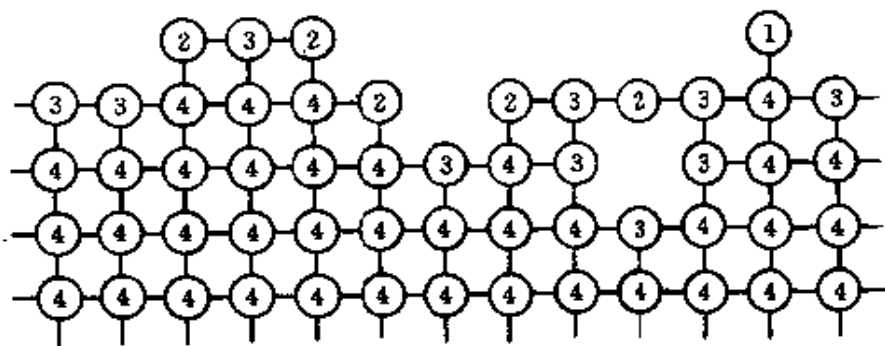


图 3-1 表面层横截面模型

在结晶材料中,有一些点状缺陷,如空穴、填隙原子、杂质原子和具有不同化合价的离子等,从熵的角度来考虑时,固体中每一种点状缺陷总存在一个确定的平衡浓度。金属或晶体材料中空穴的平衡浓度  $c$  为

$$c = n/N = \exp(-\epsilon/KT) \quad (3-1)$$

式中  $N$  为原子总数,  $n$  为空穴数,  $\epsilon$  为空穴的生成能,  $K$  为玻耳兹曼常数,  $T$  为热力学温度的大小。因此,空穴的浓度随温度成指数地增加。填隙原子有一个与空穴基本上相同的表达式。但金属的结构较紧密,因此形成一个填隙原子所需的能量比形成一个空穴的能量要大得多,因而空穴的平衡浓度要比填隙原子大出几个数量级。

晶格缺陷在表面层内的分布是不均匀的,所以最上层的表面原子结合能存在一定的分布规律。图 3-2 是两种结晶材料  $A$  和  $B$

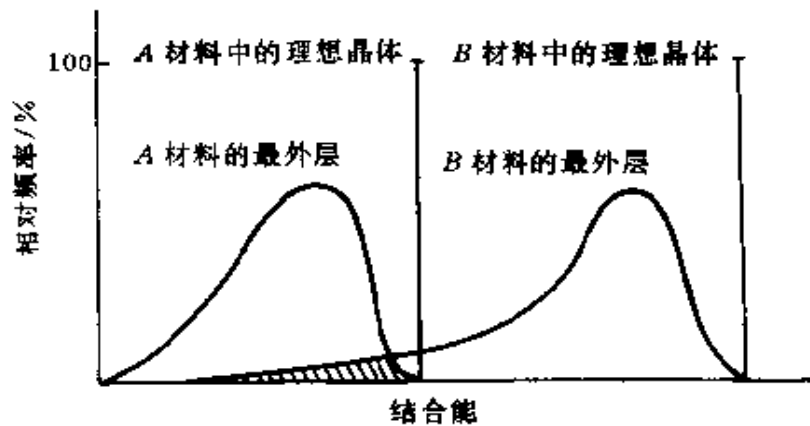


图 3-2 理想晶体最外层原子的结合能分布

的结合能分布简图<sup>[3.1]</sup>。从机械的角度来看,通常认为材料  $B$  比材料  $A$  更坚硬些。两种结合能分布可能有一个重叠的部分。当  $A$  和  $B$  这两种材料以足够产生破碎的能量相互碰撞时,材料  $B$  的表面可能被材料  $A$  所破坏。材料  $B$  的最上层表面的结合能更弱的原子将被与之接触的材料  $A$  所去除。但因为材料  $B$  本体的强度优于材料  $A$ ,所以材料  $B$  的本体被认为是丝毫不受影响的。当然材料  $B$  被破坏的可能性小于材料  $A$ ,而且很可能  $A$  的本体会被破坏和产

生塑性变形。

如上所述,表面的性质和本体有所不同。利用这一特点,可以用软材料实现没有晶格位错的超光滑加工。相反,如果在两种材料的交界面上不产生宏观的粘连时,用硬材料  $B$  抛光软材料  $A$  常常是可能的,但此时往往在  $A$  的抛光表面中产生位错。如果能实现极其轻微的抛光以防止引入或扩大软材料  $A$  中的位错以及材料  $A$  的去除仅仅是最外层原子的话,也有可能实现没有位错的超光滑表面的加工。所谓“极其轻微的抛光”的一种可能性就是用颗粒直径比  $20\text{nm}$  还小的磨料进行抛光。

以上的事实说明,不仅用软材料可以抛光硬材料,而且用比被抛光材料还硬的材料也能实现对最表层原子的去除。由于去除过程是表面的作用,因此用表面面积大的细颗粒比大颗粒更能提高加工效率。

抛光时原子的去除过程被认为是一个原子一个原子地从它们的晶格位置上离开的过程。磨料撞击工件时在接触点处可能产生很高的局部压力和温度。温度的升高会增加被加工材料和磨料颗粒两者表面层中空穴的数量,因而产生相互间的扩散。这就是说,被加工材料最外表层的原子会因扩散到磨料中而被去除,如图3-3所示<sup>[3.1]</sup>。同时,组成磨料的原子也会进入被加工材料成为杂质原子而形成像填隙原子一类的点状缺陷留在表面中。用离子微量光谱仪能探测到加工表面的表层中有这些杂质原子的存在。

在加工中会出现大量的磨料粒子碰撞被加工材料表面的现象。当磨料恰好撞击到杂质原子旁边的原子时,因为这些围绕杂质原子的原子结合能较小,所以会被磨料从它们的晶格位置上去除掉,从而被撞击原子附近的空穴浓度会有所增加。

粗略地讲,任何材料都可以作为磨料无位错地去除被加工材料的表面原子,但加工效率则决定于下列因素:颗粒撞击的概率和颗粒的动能,颗粒表层原子的结合能分布,颗粒原子进入被加工材料的难易程度,颗粒原子进入后加工表面原子结合能降低的程度以及材料表层原子的结合能分布等等。因为磨料原子会扩散到被

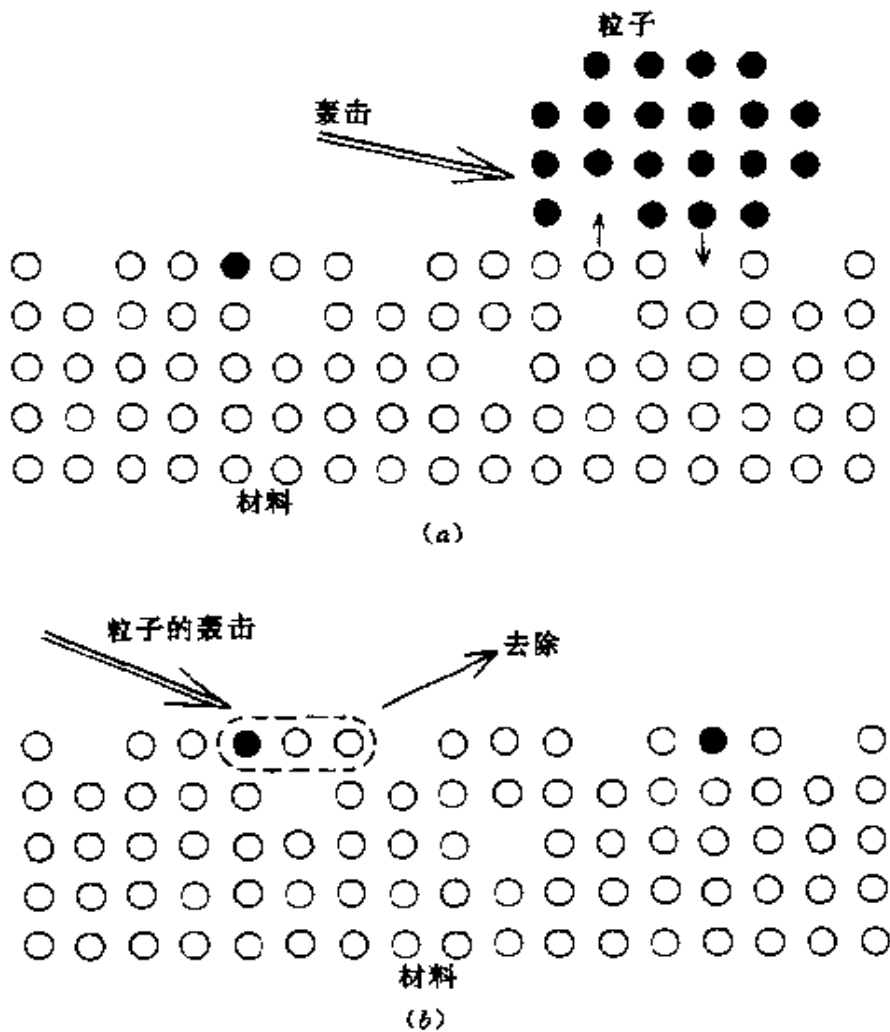


图 3-3 原子级材料去除过程的示意图

(a)扩散过程;(b)材料去除过程。

加工材料表面,在某些情况下必须考虑到这个扩散效应。

大而硬的颗粒很容易在表面上产生擦痕,而且往往很难从抛光液中去掉这些大颗粒的磨料。不同的磨料产生擦痕的难易程度也不同。因此,选择合适的磨料是超光滑表面加工中非常重要的问题。

## 3.2 水中抛光

### 3.2.1 特点

水中抛光(Bowl-Feed Polishing)方法,简称 BFP 方法,是指



抛光加工时将工件和抛光模同时都浸在抛光液中的加工方法。该方法的特点是：

(1)由于工件和抛光模都浸在水中,因而抛光时产生的摩擦热可以分散到抛光液中,不致使工件和抛光模的温度升高很多,工件的热变形和抛光模的热塑性流动可以极小。可以采用纯沥青做抛光模对零件进行抛光,从而加工表面非常光滑。

(2)抛光时使用非常细的抛光粉和很小的压力(一般在 200Pa 以下),在最后阶段还可以用稀释的抛光液或清水抛光。

BFP 方法可以用来抛光玻璃和晶体零件使其具有超光滑的表面。

### 3.2.2 水中抛光装置

水中抛光加工时所用的装置如图 3-4 所示<sup>[3,2]</sup>。它与普通的抛光机不同,它有一个绕主轴旋转的塑料缸 8。缸中装有抛光液 9。在机床不转动时液面高出抛光模表面约 10~15mm。当机床主轴转动时,由于离心力的作用抛光液流向缸的周边。在缸的边部装有搅拌器 2,用来搅动抛光液。抛光玻璃零件时一般使用氧化铁(红粉)

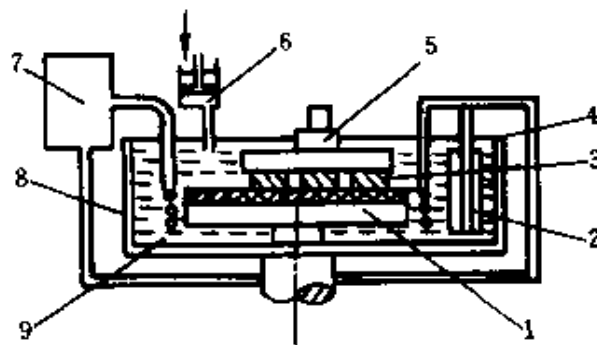


图 3-4 水中抛光装置

- 1—纯沥青抛光模;2—搅拌器;3—工件;4—夹具;5—荷重;  
6—定量供水器;7—温度调节器;8—塑料缸;9—抛光液。

作为抛光粉。氧化铁在 600℃ 的电炉中煅烧 24h,然后经球磨研细。抛光液的浓度一般为每升水中加入 20g 抛光粉。为了防止抛光过程中温度变化或长时间抛光后引起抛光液浓度的变化,该装置中

还装有温度调节器 7 和定量供水器 6。

通常,开始抛光时在缸中加入搅拌器,以便使抛光液在各处都有非常均匀的分布。当工件和抛光模表面之间已吻合得很好,接近完工时,可以将搅拌器移去。于是,在抛光液中的抛光剂就开始沉积,到达抛光模上的抛光粉逐渐减少,最后只有水流过抛光模。由于在抛光过程中,抛光粉被破碎而且压入柏油,因此,抛光模表面越来越光滑,而光滑的抛光模会极大地改善工件表面的粗糙度。

### 3.2.3 抛光工艺

#### 一、玻璃的水中抛光

用 BFP 方法抛光玻璃的工艺过程和一般的抛光大体相同。例如对一个直径为 200mm 的平面零件,抛光模的直径为 250mm,动程大约为 50~75mm。在抛光的最后阶段要在抛光液中加入水使浓度降低,直到能看清楚抛光模时再抛光 10~15min。最后要将抛光模和塑料缸清洗干净,用清水抛光 10~15min。这样能获得超光滑的表面。抛光模胶层用纯沥青做成。

用这种方法抛光石英玻璃的效果最好,其次是冕牌玻璃。用 BFP 方法抛光的石英玻璃的粗糙度可达到 0.27nm。

#### 二、硅的水中抛光

采用与玻璃相同的装置。沥青抛光模可以改用聚氨酯做成以防止抛光膜因长期泡在水中而引起的硬度变化。抛光粉一般采用氧化锆,颗粒大小为 0.1 $\mu\text{m}$  左右。

硅的水中抛光还可以采用热膨胀系数很小的玻璃(如 Cer-Vit)做成的单孔分离器,将硅片用传统的方法先加工到  $\lambda/2\sim\lambda/10$  的平面度,然后放入分离器并在孔的边部加有适当的荷重,用碱性硅悬浮液和经过处理的沥青抛光盘抛光。例如,加工硅片的直径为 76mm,荷重为 0.9kg,用 KOH 或 NaOH 水溶液(pH 值在 9.5~11 之间)和硅胶体颗粒的悬浮液抛光,4 小时后可获得平而度为  $\lambda/34$ 、粗糙度为 0.6nm 的高精度超光滑表面。

### 3.3 浮法抛光

1977年难波(Namba)首先用胶态的 $\text{SiO}_2$ 、 $\text{CeO}_2$ 及 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 组合的磨料(颗粒尺寸为 $4\sim 7\text{nm}$ )抛光青玉单晶<sup>[3.3]</sup>。抛光模是用金刚石车削而成的锡模,磨料与去离子水混合,其重量百分浓度为 $2\%\sim 8\%$ 。表面粗糙度可达 $1\text{nm}$ 以下。

这种方法的特点是:

(1)使用比普通抛光时用的柏油或树脂更硬的材料(锡)做抛光模;

(2)在抛光模和被抛光表面之间保持有厚度为数倍于磨料颗粒尺寸的液体层;

(3)工件与抛光模之间的相对速度很大,达 $1.5\sim 2.5\text{m/s}$ 。

图3-5所示为用浮法抛光方法抛光晶体或录音磁头时的装置。磨料用金刚石, $\text{Cr}_2\text{O}_3$ 和 $\text{MgO}$ 。

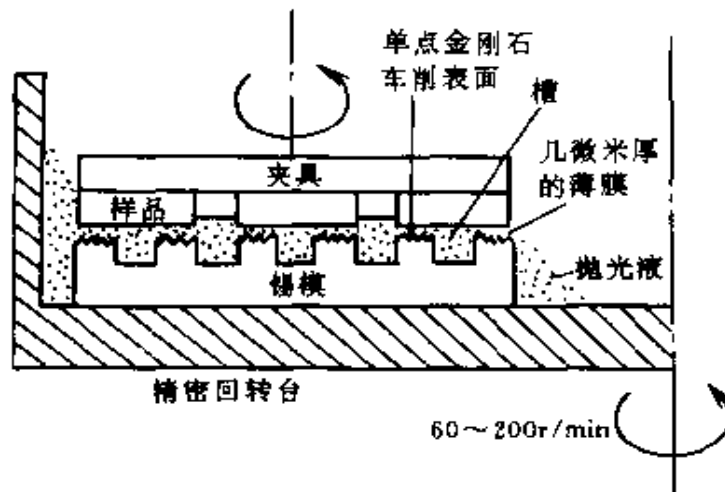


图 3-5 晶体和磁头的浮法抛光装置

目前已经将浮法抛光技术推广到进行光学材料的抛光。它可以用来抛光硼硅玻璃、熔融石英、低膨胀玻璃(如康宁公司的ULE, 萧特公司的 Zerodur)。此时,工件与抛光模之间的压力在 $70\sim 500\text{Pa}$ 之间,比一般抛光高出一个数量级。最终的表面粗糙度

(RMS)可低于 0.2nm。

### 3.4 用微弹性破坏方法进行超精加工

前面我们已经说过有可能用机械的方法在晶格尺寸的数量级上加工出不仅有镜面质量而且在晶格构造和物理性能上不受损坏的超光滑表面。基本的想法是：用细颗粒磨料与工件表面进行碰撞，如果其应力场的大小比材料原先存在的缺陷之间的距离还要小的话，就能产生晶格数量级的弹性破坏，以致不会留下产生弹性变形的表层。材料中原先存在的位错浓度是有限的，它大约为  $10^8/\text{cm}^2$  这个数量级，因此这些点状缺陷之间的间隔大约为  $1\mu\text{m}$ 。在此间隔内，材料的结构和强度可以认为是理想的。如果机械加工产生的破坏作用范围小于该区间的话，原先存在的缺陷就不发生作用，那末就能实现从晶体上原子级去除的弹性破坏。在此概念的基础上产生了名为“弹性发射加工”(Elastic Emission Machining)的超精加工方法。

微粉磨料颗粒碰撞工件表面的方式有振动碰撞、由转动圆盘进行的循环碰撞、用气流进行的循环碰撞以及用静电加速的离子碰撞等四种。影响弹性发射加工性能的因素有：在材料中原先存在的缺陷的浓度，它们的迁移率，弹性，原子结合能，磨料颗粒的大小，碰撞角和磨料所具有的动能等。

1979年莫里(Mori)等开始用弹性发射加工方法对硅、锗等半导体和玻璃进行计算机数控抛光<sup>[3,4]</sup>。这种方法的加工装置如图3-6所示。它与浮法抛光的主要差别是采用比较软的聚氨酯转动球作为抛光模。

它与浮法抛光相似之处是：

(1)在球抛光模和工件表面之间保持液体层，此层的厚度要比磨料颗粒尺寸大得多；

(2)工件和抛光模的相对速度很大，达  $3\text{m/s}$ ；

(3)工件与抛光模之间的压力非常大，达到  $500\text{kPa}$ ，大约高出

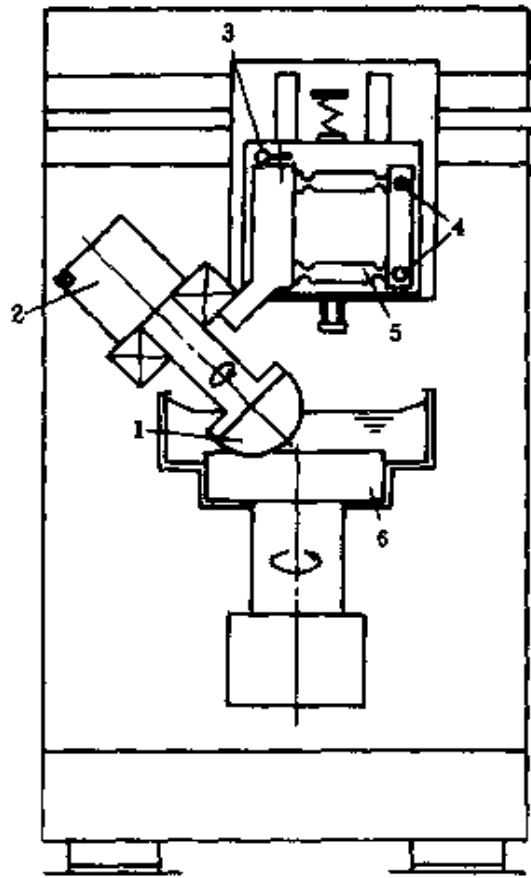


图 3-6 弹性发射加工装置示意图

- 1—球形工具；2—高速直流电机；3—电子显微镜头；4—固定点；  
5—片簧铰链机构；6—被加工物。

浮法抛光时的三个数量级。

在此方法中，直径为 56mm 的聚氨酯球安装在可变速电机的驱动轴上。转动轴与被加工工件表面构成约为  $45^\circ$  的角度。工件浸在由  $ZrO_2$  或  $Al_2O_3$  磨料和水组成的液浆中。颗粒尺寸为  $20\text{nm} \sim 20\mu\text{m}$ 。但大多数情况是球底与工件之间保持厚度大约为  $1\mu\text{m}$  的液体层，而磨料的尺寸为  $0.1 \sim 0.6\mu\text{m}$ 。液浆循环使用并保持恒温。

用此方法加工玻璃时表面粗糙度(RMS)可达  $0.5\text{nm}$ ，抛光单晶硅时的表面粗糙度(RMS)约为  $1\text{nm}$ 。

除上述提到的方法外，还可以用磁场精密加工(MFAFF)、中性离子束成型(IBF)、等离子化学腐蚀(PACE)、单点金刚石车削

(SPDT)及塑性研磨(DG)等方法进行超光滑表面的加工<sup>[3.5]</sup>。

### 3.5 超光滑表面粗糙度的测量

#### 3.5.1 接触式测量

测量超光滑表面用的接触式测量仪器有英国泰勒·霍普森公司制造的 TALYSTEP, FORMTALYSURF 和英国国家物理实验室研制的 Nanosurf 2 型表面粗糙度测量仪。

下面主要介绍一下用 FORMTALYSURF 测量表面粗糙度的方法。

在这种仪器的移动头中装有两个干涉仪。图 3-7 是这种仪器的结构方框图<sup>[3.6]</sup>。

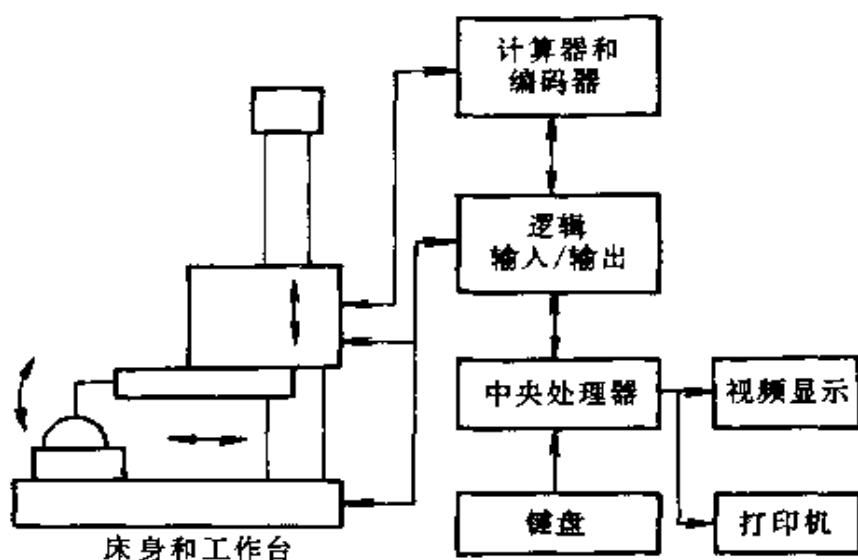


图 3-7 FORMTALYSURF 的方框图

仪器主要性能是:测量距离为 120mm;测量范围为 4mm(或 8mm);分辨能力为  $0.01\mu\text{m}$ ;转换器为激光干涉或转换器;可测量的表面形状有平面、凸面、凹面、非球面;触针是半径为  $2\mu\text{m}$  的金刚石;触针压力为 0.001N;粗糙度测量精度在示值的  $2\% \pm 0.004\mu\text{m}$  以内。

移动测量头的结构如图 3-8 所示<sup>[3.6]</sup>。

为了大幅度地提高纵向测量范围和精度,测头部件中使用了

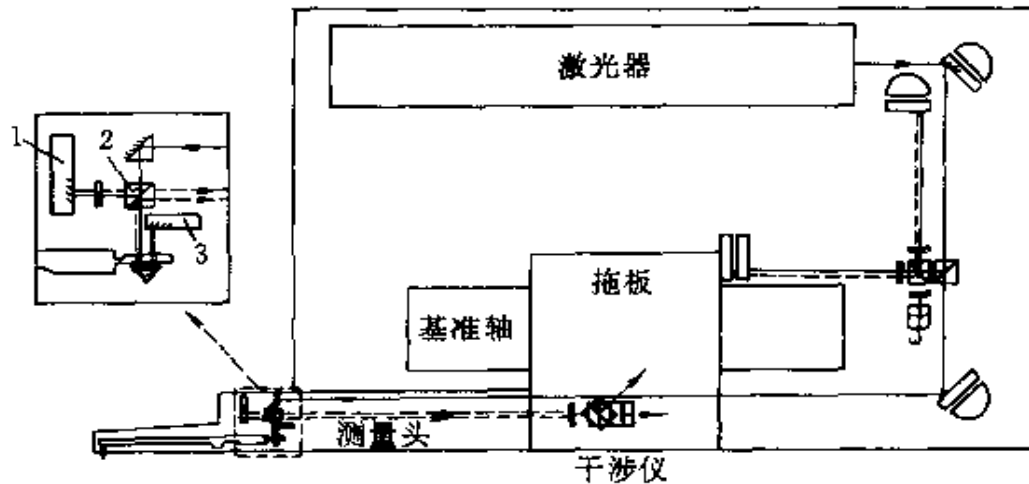


图 3-8 移动测量头的结构

1—固定反射镜；2—固定分束镜；3—可移动反射镜。

激光干涉仪。从氦氖激光器发出的激光通过固定的分束镜分成两束方向不同的光线。其中一束光传向固定的反射镜，另一束则传到可移动的反射镜。把光程差所引起的位相差转换成电信号就可以得到两维的位置信息。

### 3.5.2 非接触式测量

#### 一、干涉法

利用相移技术和外差干涉技术可以测量超光滑表面的粗糙度。最典型的仪器有美国 WYKO 公司的 TOPO-3D, 美国 ZYGO 公司的 MAXIM-3D 和 ZYGO 5500 等三种测量仪器。下面对其中两种表面粗糙度测量仪作简要的介绍。

#### (一) TOPO-3D 粗糙度测量仪

这种仪器由显微镜, 干涉仪, 成像传感器, 中接口和微计算机等构成。

干涉仪的型式随成像倍率的不同而不同。低倍率(1.5、2.5 和 5 倍)时使用迈克尔逊干涉仪, 如图 3-9(a)所示。当成像倍率为 10~40 倍时, 要采用 MIRAU 型干涉仪, 如图 3-9(b)所示。成像倍率更高时则采用 LINNIK 型干涉仪(图 3-21(c))<sup>[3.6]</sup>。

图 3-10 所示是用 LINNIK 物镜头测量时的光路图<sup>[3.6]</sup>。光源

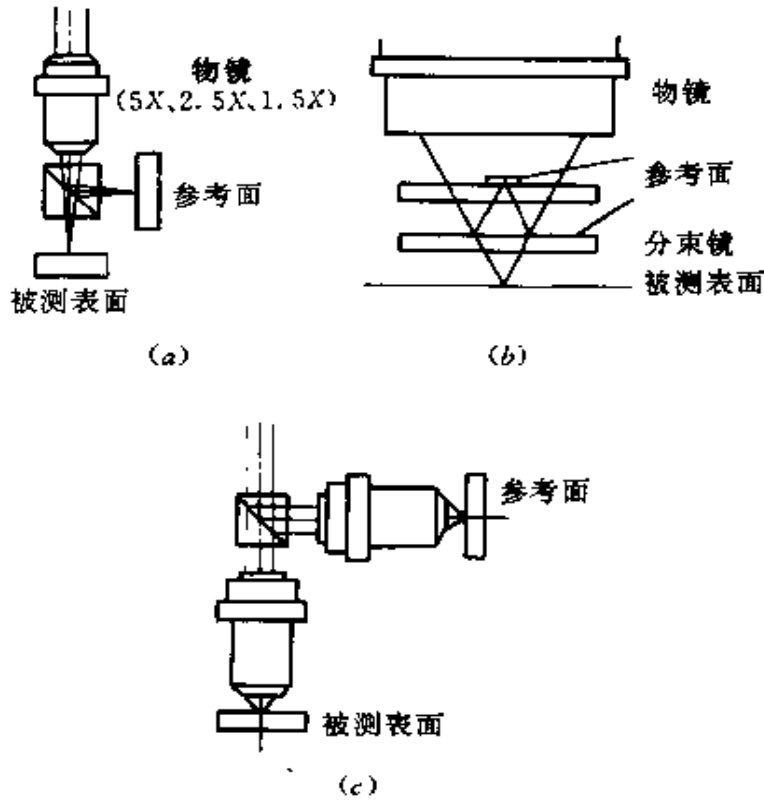


图 3-9 成像倍率与干涉仪的种类

(a)迈克尔逊干涉仪；(b)MIRAU 型干涉仪；(c)LINNIK 型干涉仪。

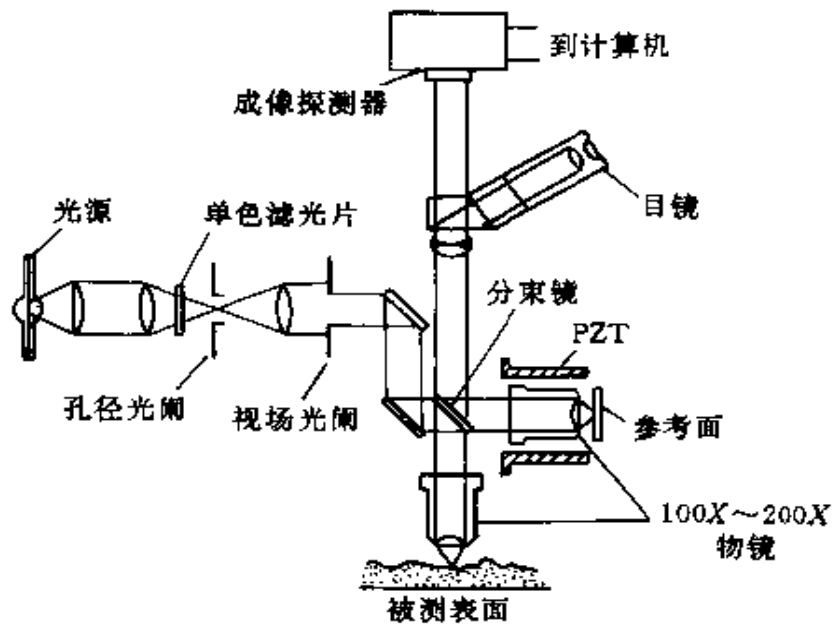


图 3-10 TOPO-3D 用 LINNIK 物镜时的光路图



采用卤素灯。选用滤光片以便得到不同波长的光线,通常选用中心波长为 650nm,带宽为 40nm 的滤光片。用眼睛从目镜可以看到干涉图形。成像传感器采用  $256 \times 256$  像素的面阵。传感器读取 3 次或 3 次以上的干涉图形,每两次之间参考反射镜仅移动  $\frac{1}{8}$  波长,从而计算出被测表面的形状。

在表 3-1 中列出了 TOPO-3D 非接触表面粗糙度测量仪的性能<sup>[3.6]</sup>。

表 3-1 TOPO-3D 的性能

物镜的倍率	1.5×	2.5×	5×	10×	20×	40×	100×	150×	200×
干涉仪的型式	迈克尔逊干涉仪			MIRAU 干涉仪			LINNIK 干涉仪		
轮廓长度/mm	6.8× 6.8	4.1× 4.1	2.0× 2.0	1.0× 1.0	0.5× 0.5	0.25× 0.25	0.1× 0.1	0.068× 0.068	0.05× 0.05
样品间隔/ $\mu\text{m}$	26.67	16.00	8.00	4.00	2.00	1.00	0.400	0.267	0.200
工作距离/mm	11.5	1.5	1.5	4.5	2.5	4.0	1.0	0.2	0.2
表面最大高度/ $\mu\text{m}$	7.92	7.92	7.92	7.80	3.95	1.95	0.60	0.54	0.54
表面最大倾斜度/ $^{\circ}$	0.26	0.44	0.87	1.75	3.49	6.98	17.45	26.19	34.91
物镜的数值孔径	0.0366	0.075	0.1	0.25	0.4	0.5	0.9	0.95	0.95
分辨极限/ $\mu\text{m}$	10.83	5.29	3.97	1.59	0.99	0.79	0.44	0.42	0.42

## (二)ZYGO 5500 超精密表面粗糙度测量仪

它是用光学外差干涉法来测量表面粗糙度的仪器,该仪器的光路如图 3-11 所示<sup>[3.6]</sup>。

干涉仪系统由防震台,激光器,Nomarski 干涉仪,空气轴承回转台,编码器和光电探测器构成。氦氖激光器发出两个不同频率,其频率差保持为 250kHz 的平行的偏振光。光线经准直后通过可变换的中性滤光片。光线经反射系统进入由渥拉斯顿(Wollaston)棱镜,物镜和被测表面组成的诺马斯基干涉仪。光线进入干涉仪后,渥拉斯顿棱镜将两束偏振光分割成不同的角度,如图 3-12 所示<sup>[3.6]</sup>。光线通过物镜后,两光束在被测表面上成像。

空气轴承回转台周期性地回转,仪器内部的编码器算出回转

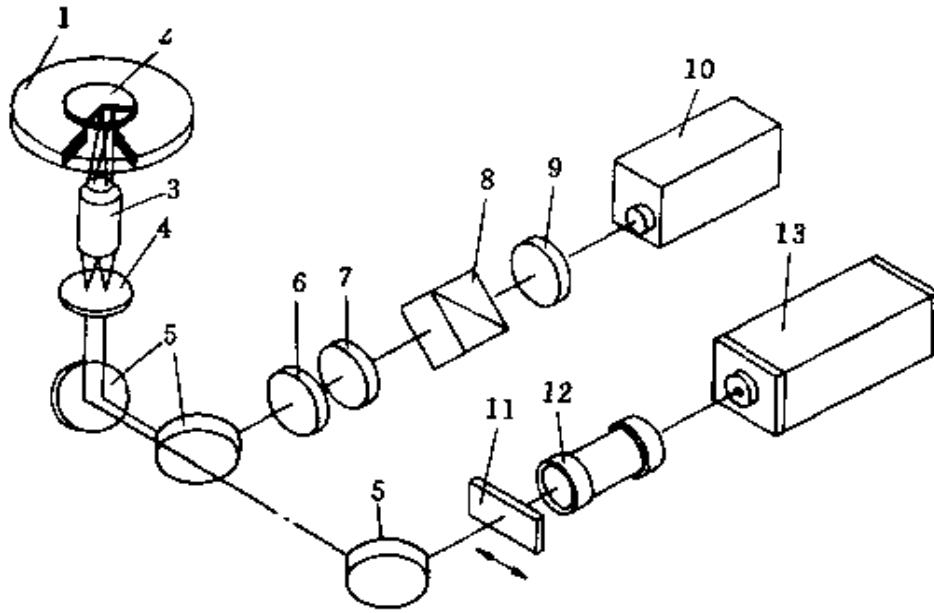


图 3-11 ZYGO 5500 光路图

1—光学编码；2—样品；3—物镜；4—渥拉斯顿棱镜；5—反射镜；  
6— $\frac{1}{4}$ 波片；7—半波片；8—偏振分束镜；9—聚焦透镜；  
10—探测器；11—中性密度滤光片；12—准直镜；13—塞曼激光器。

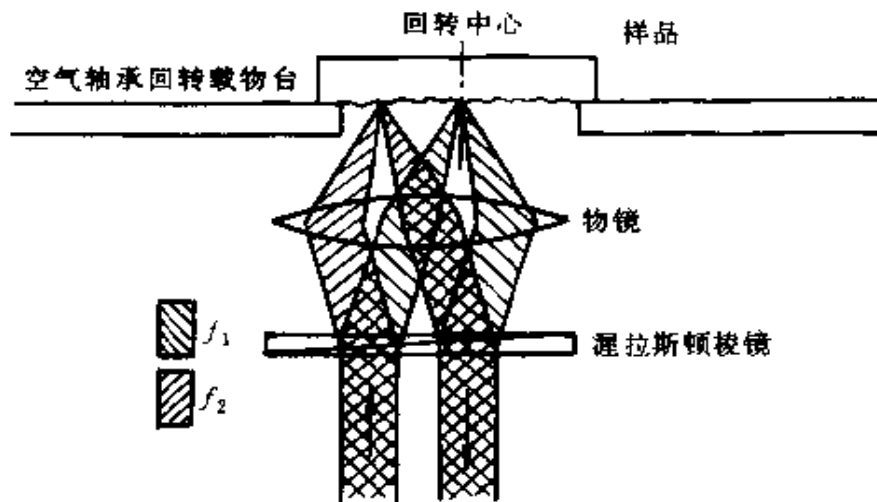


图 3-12 诺马斯基干涉仪原理图

$f_1$ —频率为  $f_1$  的偏振光； $f_2$ —频率为  $f_2$  的偏振光。

的角度。为了让其中的一束激光成为固定的参考光，应该把它调整到回转轴上。这样，即使回转台旋转，参考光总是照射在测量表面某一点上。而另一束光则作为测量光线扫描被测表面。从被测表

面反射的两束光返回到物镜,通过渥拉斯顿棱镜再结合在一起,成为与入射光平行的光束返回。结合的光束再经过反射系统, $\frac{1}{4}$ 波长片和半波片。该波片可用来调整参考光和测量光的相对位相差。两束互相正交的偏振光用偏振分光镜合成后聚焦在接受器的光电探测器上。

两束光的位相差反映了被测表面上两点之间的高度差。由于参考光是从同一点反射的,因此位相差的变化,扫描位置的高度变化就表示了表面的粗糙度。

位相计测量从接受器来的测量信号和参考信号的位相差。参考信号从氦氖激光器输出,它的差拍频率用两个直线偏振光的频率差表示。数字多量程测量仪将位相计输出的模拟量变换成用外部计算机传送的 IEEE—488 的数字输出。从空气轴承回转台可以得到 TTL 输出信号。

ZYGO 5500 和那些需要独立的参考面的仪器不同。由于它参考同一被测表面的同一点,因此振动和外来的影响可以减小到最小程度,达到非常高的重复精度,实现超精密表面粗糙度的测量。

ZYGO 5500 粗糙度测量仪的性能如表 3-2 所示<sup>[3,6]</sup>。

表 3-2 ZYGO 5500 粗糙度测量仪的性能

垂直方向的测量范围	0.01~300nm(P-V 值)
垂直灵敏度	<0.01nm(P-V 值)
光点尺寸	<2.0 $\mu$ m
采样分辨能力	<1.0 $\mu$ m
垂直方向重复精度	$\leq$ 0.01nm(被测表面的粗糙度(RMS)<1 $\mu$ m 时)或 RMS 值的 2%
扫描距离	10mm 的圆周
扫描速度	30s 回转 360°
测量时间	从物体装定好到图形输出不多于 1min
每次扫描采样数	1024
样品反射率	4%~100%
样品大小	使用专用夹具后可从 12mm 到 300mm

用 ZYGO 5500 粗糙度测量仪可以测量激光陀螺用的光学零件,激光核融合用的光学零件,金刚石车削表面和  $x$  射线反射镜等超精密光学零件的表面。

## 二、临界角法

### (一)变位测量原理

光学式微小变位传感器(以下称 HIPOSS)是应用临界角检查焦点误差的方法来测量表面粗糙度的。图 3-13 表示了变位测量的原理<sup>[3,6]</sup>。

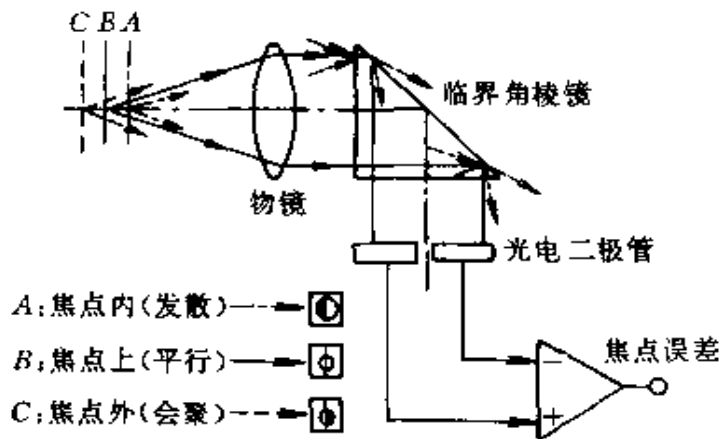


图 3-13 临界角法变位测量的原理

当试件表面位于物镜的焦点位置时,通过物镜的反射光成为平行光束入射到临界角棱镜上。因为棱镜的反射面与光线成临界角,因此两个光电二极管接受相同的反射光能而使差动放大器的输出为零。

若试件表面移动到 A 或 C 时,通过物镜的光线就成为发散或会聚光入射到临界角棱镜上。结果使两个光电二极管上接受的光能量不等,差动放大器就会产生模拟的变位输出。

### (二)测量装置的光学系统

图 3-14 为 HIPOSS 的光学系统<sup>[3,6]</sup>。从激光二极管(波长 780nm,最大功率 5mW)射出的光由准直透镜变成平行光束,以 s 偏振光入射到偏光分光镜上。被分光镜反射的光线通过  $\frac{1}{4}$  波长片成为圆偏振光,通过物镜( $NA$  为 0.6)聚焦成  $1.6\mu\text{m}$ (爱里圆斑)

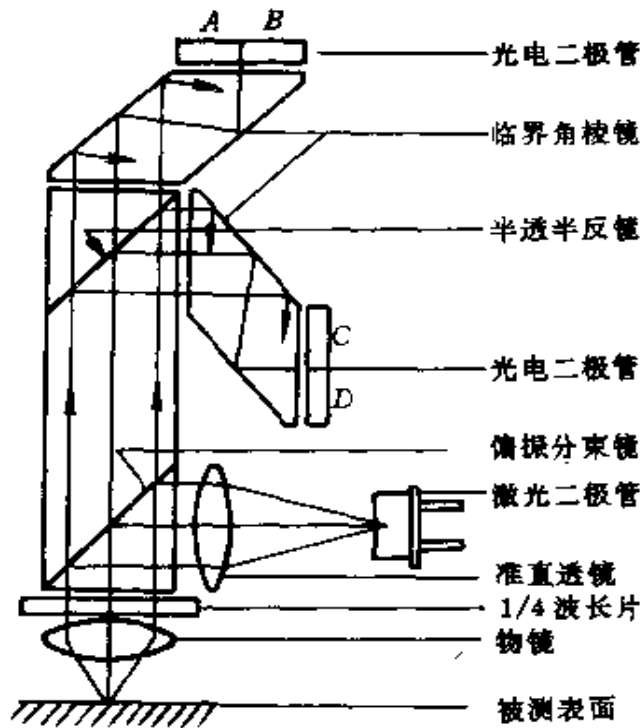


图 3-14 HIPOSS 的光学系统

的光点照射在被测表面上。从被测表面反射的光再通过物镜和  $\frac{1}{4}$  波长片成为 P 偏振光通过偏光分光镜。这束光由半透半反镜分成两束光入射到临界角棱镜上,用光电二极管进行光电转换。变位输出量可以表示成:

$$\text{变位输出} = \frac{(A - B) + (C - D)}{A + B + C + D}$$

仪器装有两个临界角棱镜,这是为了消除由于试件表面倾斜或反射率和光源不稳定所带来的影响。另外,临界角棱镜的两次反射又可以提高测量的灵敏度。

### 三、用扫描隧道显微镜 (STM) 测量表面粗糙度

#### (一) 基本原理

尖的金属探针和导电的被测表面靠近到间隔大约为 1nm 的时候,若在该探针和试件间加上几百毫伏的电压的话,就会产生隧道电流,如图 3-15 所示<sup>[3.6]</sup>。

隧道电流和自由电子相近似,可以用下式表示它的大小。

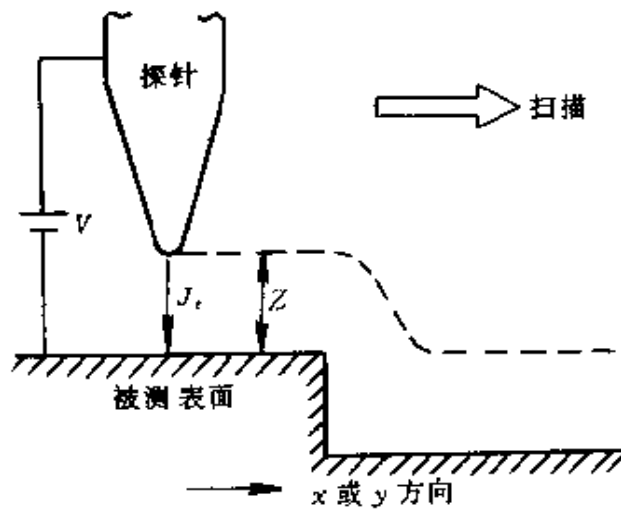


图 3-15 STM 的工作原理

$$J_t = (\beta V / 2\pi\lambda_z) \exp(-2z/\lambda) \quad (3-2)$$

式中  $\lambda = h / 2\pi \sqrt{2m\phi}$ ,  $\beta = e^2 / h$ 。

$J_t$ : 隧道电流;

$z$ : 探针与试件表面的距离;

$V$ : 电压;

$h$ : 普朗克常数;

$m$ : 电子质量;

$\phi$ : 功函数;

$e$ : 电子电荷。

由此看出,  $J_t$  对  $z$  的变化是极其敏感的, 例如, 当铂探针与金表面有 0.3nm 的距离变化时, 电流会有 1~10nA 的变化。

因此, 当探针沿被测表面移动时, 如果保持隧道电流不变, 就要控制  $z$  值, 因此要改变控制  $z$  轴 PZT 上的电压, 最后将电压的变化转换成表面的凹凸变化。这种方法称为定电流法。还可以采用不控制  $z$  值, 而将电流的变化变换成 STM 的图像, 这称为可变电流法。

## (二) 装置的构成

图 3-16 示出了实现 STM 测量时基本构成的方框图<sup>[3.6]</sup>。

隧道偏置电压一般采用几十毫伏。由于被测表面是凹凸不平

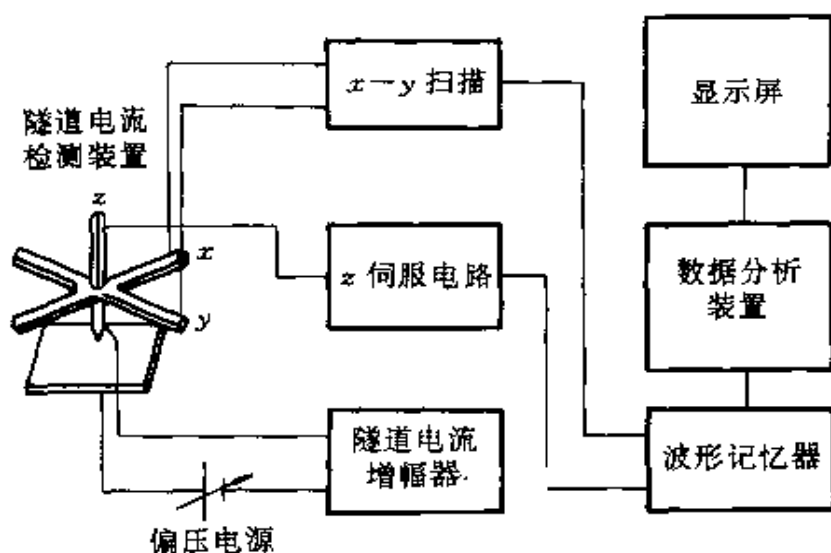


图 3-16 基本构成的方框图

的,因此流过的隧道电流会发生变化。要使电流不发生变化就要用  $z$  轴伺服电路控制  $z$  轴的 PZT。对每个测量点所得到的加在  $x$ 、 $y$  轴和  $z$  轴 PZT 上的电压用波形记忆器记录下来,再通过数据分析装置进行必要的处理(如用等高线表示等等)。

### 参 考 文 献

- 3.1 Namba Y, et al. Mechanism and Some Application of Ultra-fine Finishing. Annals of CIRP, 27, 511-512
- 3.2 查立豫等. 光学零件工艺学. 北京:兵器工业出版社
- 3.3 Namba Y, et al. Ultra fine Finishing of Sapphire Single Crystal. Annals of CIRP, 26(1), 325-329
- 3.4 Mori Y, et al. Numerically Controlled Elastic Emission Machining—Motion Analysis of Fluid and Distribution of Film Thickness. J. Journal of the Society of Mechanical Engineers, 49(11), 1983
- 3.5 Stowers I F, et al. Review of Precision Surface Generating Processes and Their Potential Application to The Fabrication of Large Optical Components. Proceedings of SPIE, 966, 62-73
- 3.6 深江秀和等. 超精密表面性状評価技術. 光技術コンタクト, 26(11)

## 第四章 全息工艺技术

### 4.1 引言

全息术又称为波前记录和再现技术,是由英国科学家丹尼斯·伽柏在1948年发明的。伽柏发明全息术的直接推动力是为了完成英国汤普森—休斯顿实验室委托的改善电子显微镜分辨率的任务。迄今,虽然伽柏希望通过波前重现技术将显微镜的分辨率提高到0.1nm的初衷尚未实现,但通过几代科学工作者的努力,全息术的方法,工艺和应用范围已被大大地扩展,已成为现代成像理论中占有十分重要地位的技术。

本章的内容是介绍各种类型全息图的制造方法,所用的仪器、设备和原材料,常用的工艺技术条件等。在总体考虑上,我们把全息图分为干涉全息图和数字全息图或计算机全息图来叙述,在计算机全息图中,又包括了近年来迅速发展的二元光学元件制造工艺。近十多年来,全息图的大规模复制技术日臻成熟,形成了巨大的全息产业。因此我们将全息图模压复制技术从干涉全息图中分离出来,作为单独一节来叙述。

### 4.2 干涉全息图的制造工艺

#### 4.2.1 全息图的工艺技术条件<sup>[4-1]</sup>

干涉全息图是由物体透射或散射的光波与另一参考波相干涉形成的。下面的数学描述可以说明,物光波的振幅和位相信息是如何通过干涉而存储在全息图中的。设记录平面上物光波和参考波



的波函数分别为

$$O(x, y) = O_0(x, y)\text{Exp}[j\phi_0(x, y)] \quad (4-1)$$

$$R(x, y) = R_0(x, y)\text{Exp}[j\phi_r(x, y)] \quad (4-2)$$

于是对全息记录材料曝光的光强分布为

$$I(x, y) = (O_0^2 + R_0^2) + 2R_0O_0(x, y)\cos[\phi_0(x, y) - \phi_r(x, y)] \quad (4-3)$$

全息记录材料的作用是把曝光时接收的光强分布线性地转变为显影后全息图的复振幅透过率函数  $t(x, y)$

$$t(x, y) = t_b + \beta(O_0^2 + R_0^2) + 2\beta R_0O_0(x, y) \cdot \cos[\phi_0(x, y) - \phi_r(x, y)] \quad (4-4)$$

在全息图记录过程中,由于参考波通常采用平面波或者球面波等简单光波,它在记录平面上的振幅和位相可看作常数或有规律分布,因此从式(4-4)看出,全息图上干涉条纹的空间分布(包括亮暗纹位置、方向、空间频率)编码了物体的位相信息;而干涉条纹的反衬度则编码了物体光波振幅信息。因此物光波的信息就通过对于干涉场强度的幅度调制和位置调制的方式存储下来。

从前面所分析的全息图的成图过程很容易想到,要制造一个高质量的全息图,必须满足以下的工艺技术条件。

(1)所采用的全息记录系统,包括光源和光学装置,应满足干涉的基本条件,以保证在记录平面叠加的物光和参考光频率相同,振动方向相同,具有恒定的初位相差,从而能产生高对比度的不随时间变化的干涉条纹。

(2)从公式(4-3)可以导出,全息图上干涉条纹的对比度为

$$v = \frac{2\sqrt{\epsilon}}{1+\epsilon} |\cos\theta| \quad (4-5)$$

其中  $\epsilon = \frac{I_r}{I_0}$  为参考光和物光的光强比,称为光束比; $\theta$  表示参考光和物光振动方向之间的夹角。因此,除了保证参考光和物光的振动方向相同,还应保证二者的光束比尽量接近于 1。

(3)采用合适的光记录材料和合适的处理工艺,以便能将稳定的干涉强度分布“冻结”在记录材料上。在记录过程中,选择合适的曝光量也是至关重要的。只有这样,才能将曝光的光强分布线性地转变为全息图的振幅透过率。

#### 4.2.2 全息记录装置

##### 一、激光光源

尽管全息术出现在激光器诞生之前,但由于激光光源的各种优越的性能,它已成为全息图记录中至今尚无可替代的光源。

在全息记录中,对激光光源最重要的性能要求有空间相干性(由横模确定),时间相干性(由纵模确定),光束发散角(由光斑直径确定),输出功率,输出稳定性,光谱分布,能量转换效率和使用寿命等。

目前在全息记录中最常用的气体激光器有 He—Ne 激光器(主要输出波长  $\lambda=632.8\text{nm}$ ),He—Cd 激光器(主要输出波长  $\lambda=441.6\text{nm}$ ), $\text{Ar}^+$  激光器(主要输出波长  $\lambda=457.9\text{nm}$ , $488\text{nm}$ , $514.5\text{nm}$  等), $\text{Kr}^+$  激光器(主要输出波长  $\lambda=413\text{nm}$ , $647.1\text{nm}$  等)。而常用的脉冲激光器有红宝石激光器(输出波长  $\lambda=694.3\text{nm}$ )和掺钕的 YAG 激光器(倍频输出波长  $\lambda=530\text{nm}$ )。

##### 二、全息防震台

由于全息图记录了物光波和参考波的干涉条纹,所以当两束光的光程差变化  $\lambda/2$ ,或位相差改变  $\pi$  时,条纹将移动半个周期。如果在曝光过程中发生这种条纹运动,将使全息图条纹对比度下降。因此全息记录装置必须固定在防震台上。

全息防震台的作用:第一是隔震,即能有效地隔离外界震源造成的垂直和水平震动;第二是消震,即利用防震台的阻尼迅速消除台面元件的微小震动。

美国 Newport 公司生产的 RS 型气浮式防震台,利用气垫原理和台面的阻尼结构,是目前最理想的全息防震台。但是根据我们的经验,采用充气的摩托车内胎来支撑台面,也能达到满意的防震

效果(见图 4-1)。

防震台的稳定性,可在台上布置一个迈克耳逊干涉仪来检验。

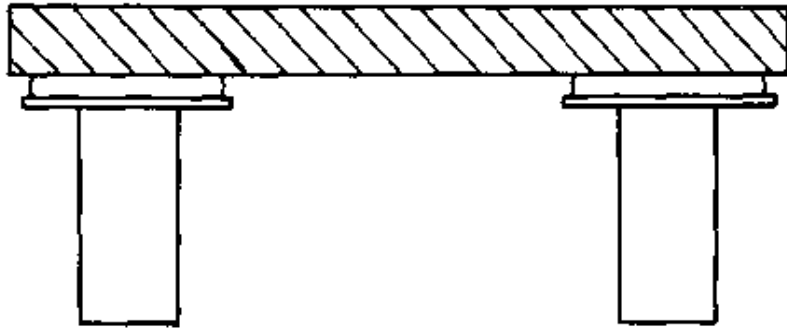


图 4-1 轮胎隔震的防震台

### 三、全息光学装置

记录全息图的光学装置主要包括平面反射镜、分束镜、透镜、柱面镜、扩束镜、针孔滤波器、散射屏、可变圆孔光阑和狭缝光阑、底片架、快门和定时器、功率计等。

评价全息记录元件性能优劣的指标有:(1)能精确地实现光束转向、分束、扩束、准直、成像等功能;(2)结构稳定;(3)便于作多个自由度调节;(4)具有最小的光能损耗。

在所有光学元件中,分束镜的作用是至关重要的。理想的分束镜除了能使光束比连续可调以外,还要求有尽可能高的光能利用率,图 4-2 所示由格兰—空气棱镜、一对  $\frac{\lambda}{4}$  波片和一个半波片组

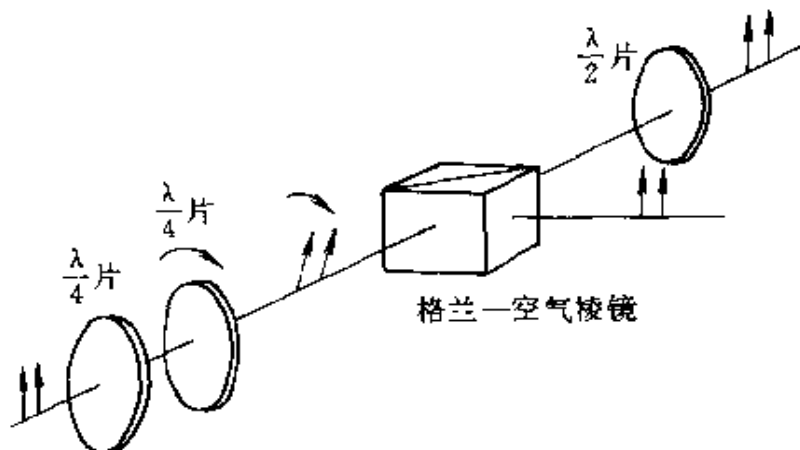


图 4-2 偏振分束镜原理

成的偏振分束镜可满足上述的条件。除此之外,该装置还能灵活地将出射光束的偏振方向调成垂直或水平。

#### 四、条纹反馈控制系统

在全息记录过程中,尽管利用防震台隔离了外界的震动,但由于曝光期间气流、温度或应力而引起两束光的光程差改变仍然在所难免,从而会引起干涉条纹的漂移或低频振动。为了解决上述问

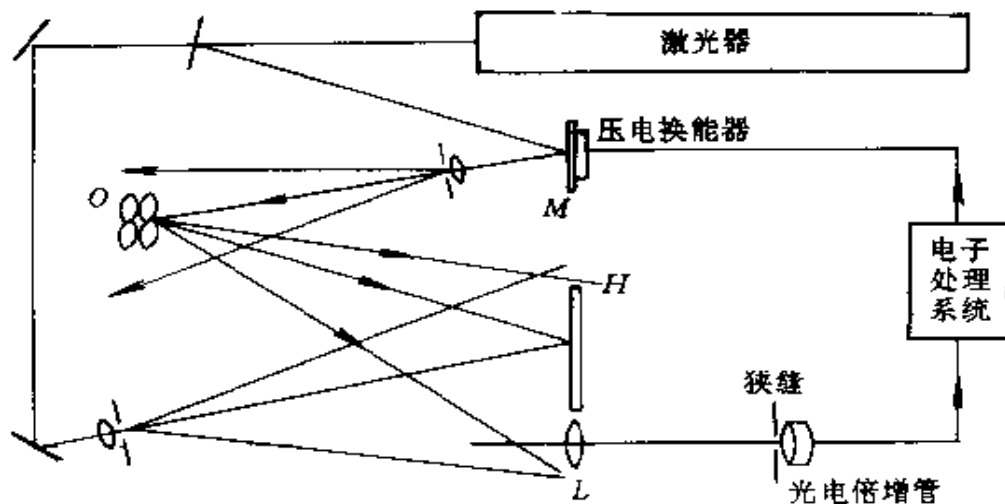


图 4-3 条纹反馈控制系统

O—物体;H—全息图;M—反射镜;L—透镜。

题,人们设计了图 4-3 所示的条纹反馈控制系统。其中,透镜  $L$  将干涉条纹成像在光电倍增管的入射狭缝上。当记录光路的光程差变化时,条纹发生漂移,光电倍增管将变化的光强信号转变为电信号。经过放大、比相、细分等系统,产生一个与光程差变化成比例的反馈信号,此信号作用于压电换能器,引起反射镜  $M$  的移动,以补偿光程的变化,达到稳定干涉条纹的目的。美国奥兰多市的 Odhner Holographics 公司已制成了 STABILOCK II 型条纹稳定装置,作为商品出售。应用该装置甚至可以用气体激光作光源拍摄小位移运动物体的全息图。

#### 4.2.3 全息记录材料

全息记录材料及其处理工艺是影响全息术发展和应用的最关

键的技术,因而是全息术中最活跃的研究领域之一。表 4-1 给出最常用的几类全息记录材料及其主要技术性能。

表 4-1 常用全息记录材料及主要性能

名称	调制方式	光谱范围 /nm	感光灵敏度 (J/cm <sup>2</sup> )	极限分辨率 (线/mm)	适用全息图 类型	衍射效率 极限	可否重复 使用
卤化银乳 胶	振幅调制 位相调制 (漂白)	全色	10 <sup>-5</sup> ~10 <sup>-7</sup> 量级	<3000	振幅全息图 位相全息图	40%左右	不能
重铬酸盐 明胶	位相调制	250~520	10 <sup>-2</sup> 量级波 长为 488nm 时	5000	位相全息图	>90%	不能
光致 抗蚀剂	位相调制	250~500	10 <sup>-2</sup> 量级 波长为 442nm 时	1500	浮雕位相 全息图	30% 左右	不能
光致 聚合物	位相调制	350~550	10 <sup>-3</sup> 量级	5000	位相全息图	>90%	不能
光导 热塑料	位相调制	全色	10 <sup>-4</sup> ~10 <sup>-5</sup>	4000	浮雕位相 全息图	20%左右	能

#### 4.2.4 全息图的记录方法

##### 一、菲涅耳全息图的记录

菲涅耳全息图是一种激光再现全息图,是应用最广泛的一类全息图。菲涅耳全息图的记录平面位置非常灵活,可在物体(包括透射和反射物体)的菲涅耳衍射场中的任意位置记录。但为了消除零级像和孪生像的影响,通常采用离轴参考束记录光路。图 4-4 是最常用的菲涅耳全息图的记录光路。

记录一个好的全息图,除了正确的光路布置和调整以外,还有几个值得注意的技术要点:

##### (一)正确选择光束比

按理论分析,当两个平面波或球面波干涉时,取光束比  $\epsilon=1$  可获得最好的条纹对比度。但在记录复杂物体全息图时,物光波是由许多球面波叠加的复杂光场,除了物光和参考光的干涉以外,物体上各个点光源发出的球面波也要互相干涉,形成一系列附加的

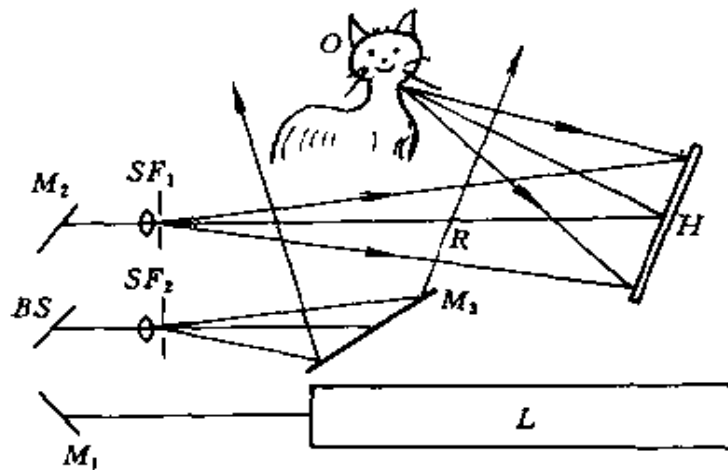


图 4-4 非涅耳全息图记录光路

O—物体；R—参考光；L—激光器； $M_1, M_2, M_3$ —反射镜；  
BS—分束镜； $SF_1, SF_2$ —空间滤波器；H—全息图。

全息图，存在称为“互调制”的现象，使得光束比的确定变得十分复杂。光束比太大，全息图的衍射效率会下降；光束比太小，则物光互调制现象严重，再现像的信噪比减小，像质变坏。此外，光束比的选择还须兼顾到物光光强的动态范围。一般应通过实验来确定。除了在记录光栅时选择  $\epsilon=1$  外，对于复杂物体， $\epsilon$  取值通常在 3~100 之间。对于某些特殊情形， $\epsilon$  甚至大于 100。

### (二) 离轴参考角 $\theta$ 的选择

离轴参考角  $\theta$  的选择应考虑记录材料的分辨率、衍射像的分离以及光路布局等几个因素。设记录材料的分辨率极限为  $f_c$ ，记录激光波长为  $\lambda$ ，则离轴参考角的最大值为  $Q_M$ 。

$$Q_M \leq 2 \arcsin \left( \frac{\lambda f_c}{2} \right) \quad (4-6)$$

离轴参考角最小值  $Q_m$  的选择受衍射像分离条件的限制。根据理论分析，要保证全息图再现的零级像和正负一级像在空间分离，离轴参考角不能小于  $Q_m$ 。

$$Q_m \geq \arcsin(3\lambda\xi_M) \quad (4-7)$$

式中  $\xi_M$  是物光波的截止频率，它和全息图的几何尺寸以及物体到

记录平面的距离有关。在实际工作中,定量计算物光波的最高空间频率是困难的。所以离轴参考角 $\theta$ 的选取更多地是根据经验,往往以不超出记录材料的分辨率的70%为宜。

### (三)曝光量和曝光时间的确定

曝光量 $E$ 定义为入射到记录材料表面上各点处单位面积的能量,单位为( $\text{mJ}/\text{cm}^2$ ),设入射光强度为 $I$ ,曝光时间为 $t$ ,则

$$E = I \cdot t \quad (4-8)$$

正确的曝光量要由记录材料对记录波长的感光灵敏度 $P$ 来确定。一般情况下,用功率计测出记录面上的光强 $I$ (注意,测量的是干涉场的局域平均值,即物光和参考光光强之和),即可直接确定曝光时间 $t$ 。但是,任何记录材料的感光灵敏度都随材料的批号、存储时间、环境温度、湿度及处理工艺而变化,所以必须通过实验来测定。

## 二、全息图主要性能参数及控制

### (一)分辨本领

全息图的分辨本领定义为从全息图再现像上能分辨的原始物体最小尺寸( $\epsilon_0$ ),全息图的分辨本领主要受全息图的衍射及参考光源、再现光源尺寸的限制。

全息图的衍射受限分辨率由全息图的有效孔径确定,表示为

$$\epsilon_1 = \frac{2\lambda z_0}{L_h} \quad (4-9)$$

其中 $L_h$ 为全息图有效口径, $z_0$ 为物距。而由光源展宽引起的像模糊为

$$\epsilon_2 = 2 \frac{z_0 \cdot \Delta}{z_R} \quad (4-10)$$

其中 $\Delta$ 表示光源横向尺寸, $z_0$ 和 $z_R$ 分别表示物距和参考光源的距离。综上所述,全息图的分辨本领可表示为

$$\epsilon_0 \geq \frac{2\lambda z_0}{L_h} + 2 \frac{z_0 \Delta}{z_R} \quad (4-11)$$

### (二)视场

全息图的视场分为瞬时视场和全方位视场。瞬时视场是在固定观察位置看到的再现像尺寸对人眼的张角,全方位视场表示在多大的观察角度内能观察到完整的全息再现像。全息图的视场主要受记录时物体的照明条件,记录材料的尺寸和分辨率以及零级像和孪生像存在的限制。为增大全息图的视场,除了选用高分辨率的记录材料和加大底片的尺寸外,如下两个措施是十分有效的。

(1)采用多束光照明,改善物体本身的散射性能,使物光波能在更大的角度内均匀散射。

(2)采用离面参考光的记录光路,如图 4-5 所示。物体  $O$  由  $S_1$  和  $S_2$  发出的两个球面波照明,参考点光源  $R$  在垂直方向上偏离全息图光轴平面。再现时零级像和孪生像在垂直方向上分离,不影响水平方向的视场角。

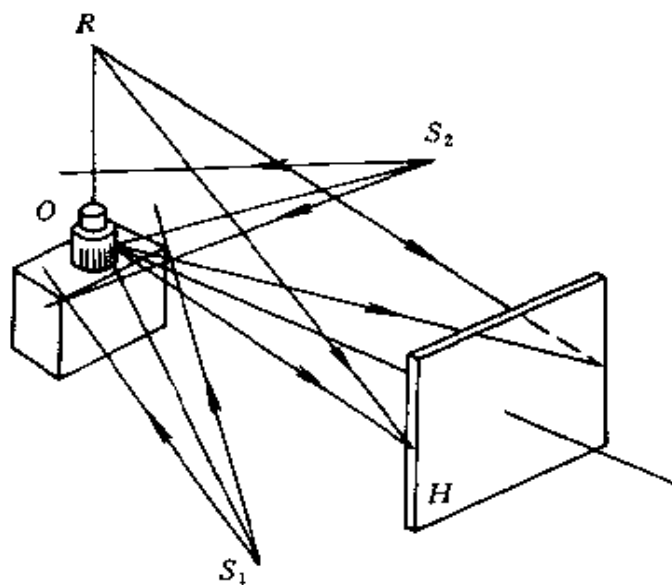


图 4-5 离面参考束记录

$O$ —物体; $R$ —参考点光源; $H$ —全息底片; $S_1$ 、 $S_2$ —照明光源。

### (三)景深

景深是指全息图能有效记录并再现的物体纵向深度。不同类型的全息图,影响景深的因素也不同,例如菲涅耳全息图,对景深的限制主要来自于光源的相干长度。对于白光再现全息图,除光源空间相干性的影响外,还受色模糊和像模糊的限制,所以增大全息



图景深的根本途径是采用长相干光程的激光器进行记录。

#### (四)衍射效率

衍射效率定义为有用衍射级的光强与入射光的光强之比值,按照耦合波理论,振幅全息图的衍射效率与记录材料的光吸收的调制度有关,吸收调制度的表现形式即是条纹的对比度。也就是说,对振幅全息图来说,条纹对比度越高,衍射效率也越高。但是振幅全息图的衍射效率理论值不超过 0.04。

对于无吸收的位相全息图,衍射效率为

$$\eta = \sin^2 \left( \frac{\pi n_1 \delta}{\lambda \cos \beta_0} \right) \quad (4-12)$$

式中  $n_1$  为折射率调制度,  $\delta$  为记录材料厚度,  $\beta_0$  为布喇格角。可见衍射效率基本由折射率调制度  $n_1$  所决定。控制  $n_1$  的大小以达到最高衍射效率的途径包括选择优良的记录材料,控制合适的曝光量,设计高性能的处理工艺等。无吸收位相全息图的衍射效率可达到 90% 以上。

#### (五)信噪比

信噪比定义为再现像的平均光强  $I_i$  和噪声的平均强度  $I_N$  的比值,它是评价全息图质量的一个十分重要的指标。

全息图再现像的噪声主要来源于记录光学系统和环境的散射噪声,记录材料的颗粒散射噪声和背景光栅形成的背景噪声。

消除光学系统和环境的散射噪声的办法,一是清洁各个光学表面;二是应用各种光阑来消除。对于记录材料的颗粒散射噪声,解决的办法,一是采用优良的处理工艺;二是尽可能采用无颗粒记录材料。对此,已有不少作者作过详细讨论,下面重点讨论背景光栅的形成和消除方法<sup>[4, 2]</sup>。

图 4-6 说明了透射全息图中背景光栅形成的原理。当物光  $i_o$  和参考光  $i_R$  照射到全息底片  $H$  上时,一部分被乳胶吸收,形成全息图,一部分在片基与空气界面处反射,如图  $i'_o$  和  $i'_R$ 。由背景反射光  $i'_o$  和  $i'_R$  干涉形成的背景光栅,可以达到很高的衍射效率,并且它的空间频率和全息图相近,因而它的衍射光将叠加在再现像上。

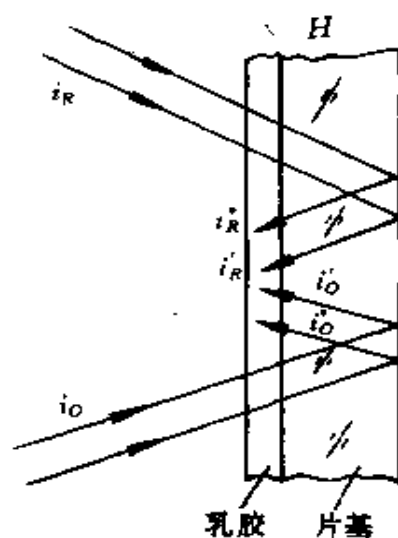


图 4-6 背景光栅的产生

此外,由于片基表面的不平,相邻的反射光  $i_R'$  和  $i_R''$ ,  $i_o'$  和  $i_o''$  等也会干涉,形成空间频率很低的条纹,这种人眼直接可见的条纹又称为莫尔纹,是又一种影响观察的噪声。

解决上述噪声的根本途径是消除光波在全息底片最后一个界面上的反射。实现这一设想的第一种方法是利用液体层的作用。图 4-7 是透射全息图消除背景光栅的记录光路;图 4-8 是反射全息图的记录光路。消除全息底片背景反射的另一个思路是利用光学中的布儒斯特定律,如图 4-9 所示。入射光是水平方向振动的线偏振光( $P$ 分量),在全息底片  $H$  上的入射角等于布儒斯特角  $\theta_b$ ,因此在各界面上都近似满足布儒斯特条件,反射系数  $\gamma_p=0$ 。这就有效地消除了全息图的背景反射。

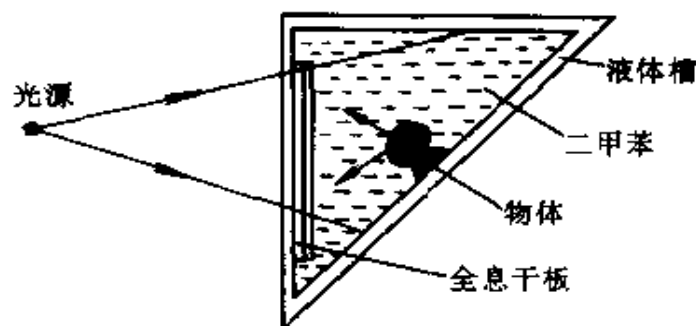


图 4-7 透射全息图记录光路

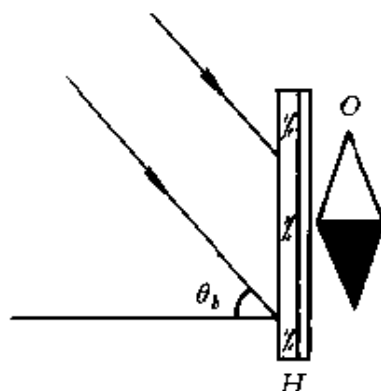
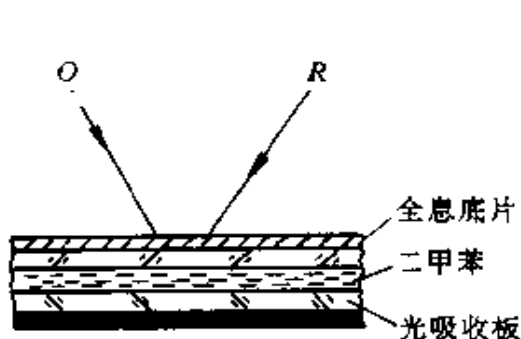


图 4-8 反射全息图记录光路

图 4-9 布儒斯特定律的应用

$O$ —物光; $R$ —参考光。

#### 4.2.5 白光全息图

白光全息图是用激光记录,用白光再现的全息图。包括像平面全息图、彩虹全息图、反射全息图、合成全息图等,这些都是主要用于三维显示的全息图。

##### 一、掩模法制造 2D 像平面全息图

像平面全息图要求在物体像平面附近记录,过去一般通过透镜,将物体成像到二维记录平面附近,如图 4-10 所示。但是这种方法严重限制了再现像的视场角,光能利用率也低。目前在实际生产中广泛采用图 4-11 所示的掩模法。将二维掩模板与全息干板乳胶面对贴在一起,用物光和参考光的干涉场对掩模板的透光部分曝光。这样记录的二维像平面全息图实际上是存储了物体二维信息的平面光栅。当用白光照明时,可观察到明亮的二维物体像;当改

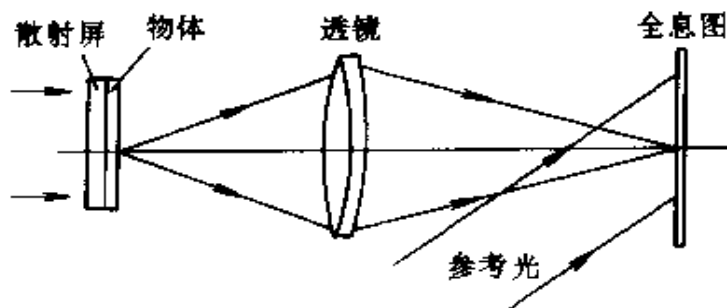


图 4-10 像平面全息图记录光路

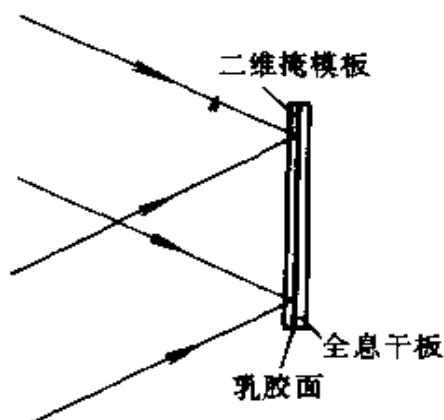


图 4-11 掩模法原理

变观察方向时,像的颜色将发生改变。对于彩色的二维物体,可利用分色制版工艺,生成一套二维掩模板,每张掩模板都是对应某种特定颜色的正透明片。这样每次应用空间频率各不相同的光栅强度图形对一块掩模板曝光,通过多次更换掩模板和多次改变参考角的曝光,即可得到一张假彩色二维像平面全息图。

掩模法的关键在于二维掩模板的制造和曝光过程中掩模板的贴置和套准。为了制造高质量的全息图,掩模板必须具有准确的尺寸和很高的反差,所以通常用高分辨高反差的照相干板来制作。曝光时,必须有一套特制的机械夹紧定位装置,以保证各种颜色的精确套准。

图 4-11 的原理光路在生产中很少采用,原因是这样记录的全息图再现像的单色性和色饱和度差,观察窗太宽,因而像的亮度较低。生产中实际采用的光路如图 4-12 所示,只要在曝光过程中分别将反射镜调到  $M_R, M_G, M_B$  等位置,并换上相应的掩模板,通过多次曝光即可制成彩色二维像平面全息图。

## 二、用横向面积分割法记录 2D/3D 全彩色全息图<sup>[4, 3]</sup>

横向面积分割法是对两步法彩虹全息图的改进,通过记录过程中对观察窗的合理横向分割,可将不同深度的层次及不同颜色的物体综合在同一幅全息图上,形成白光显示的 2D/3D 全彩色全息图。如果采用表 4-1 介绍的浮雕记录材料和相应的处理工艺,则生成浮雕位相全息图。

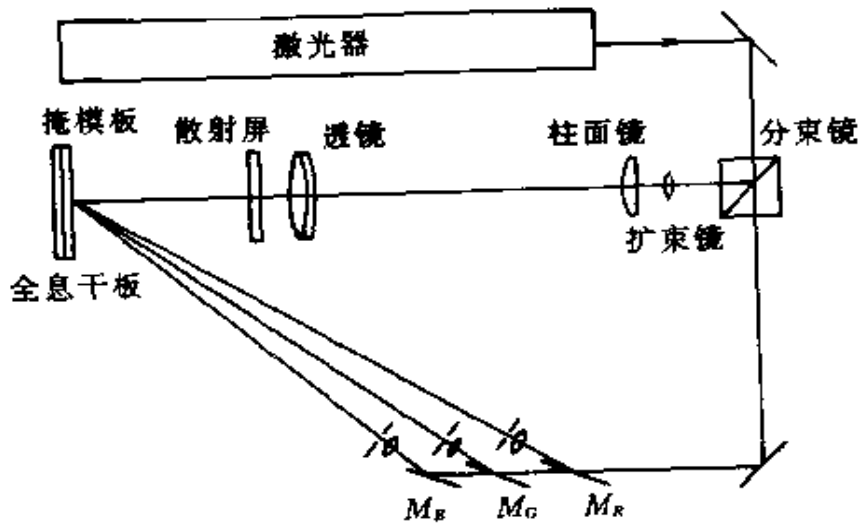


图 4-12 假彩色二维像平面全息图记录光路  
 $M_R$ 、 $M_G$ 、 $M_B$ ——反射镜的三个不同位置。

图 4-13 是横向面积分割法的基本光路。图 4-13(a) 是主全息图  $H_1$  的记录光路，在物光路中，不同的物体透明片  $O_1$ 、 $O_2$ 、 $O_3$  等根据总体设计分别放置于不同的物距和不同的横向位置，以区别

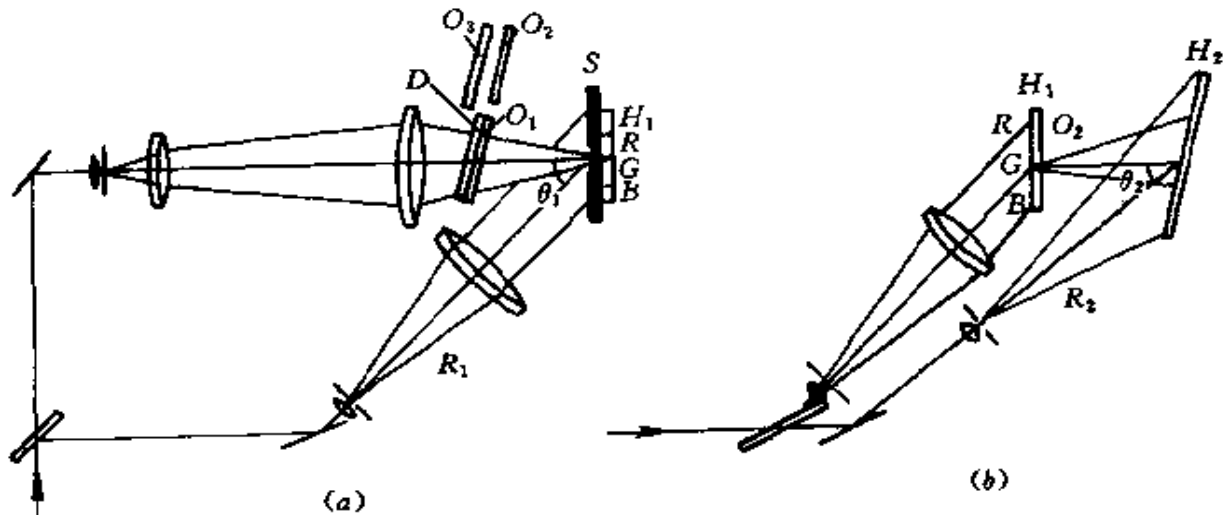


图 4-13 横向面积分割法记录光路  
 (a)  $H_1$  记录光路；(b)  $H_2$  记录光路。

$D$ —毛玻璃； $O_1$ 、 $O_2$ 、 $O_3$ —透明片； $S$ —可调狭缝； $H_1$ —主全息图；  
 $H_2$ —浮雕全息图； $R$ 、 $G$ 、 $B$ —三个记录位置； $R_1$ —参考光。

不同的深度层次和颜色。会聚光束通过毛玻璃  $D$  后照明物体透明片,以便得到均匀散射的物光波。可调狭缝  $S$  紧贴  $H_1$  乳胶面放置,通过  $S$  的横向位置和宽度调节,可将不同透明片  $O$  上的物体记录在  $H_1$  的不同位置  $R$ 、 $G$ 、 $B$  处。参考光  $R_1$  通常采用平行光,以便于实现共轭光波的照明再现。通过多次曝光和显定影处理,就得到了由一组位于  $R$ 、 $G$ 、 $B$  处的条形全息图组成的横向面积分割的主全息图  $H_1$ 。图 4-13(b)是浮雕全息图  $H_2$  的记录光路。对  $H_1$  用平行光从参考光的共轭方向照明,其+1级衍射光作为物光波,参考光  $R_2$  可采用发散球面波,只需一次曝光即可在  $H_2$  上制得多色  $2D/3D$  全息图。

在记录多色  $2D/3D$  全息图时不同物体颜色的变化是靠改变全息图的空间频率来实现的,也就是说靠改变记录光路中物光和参考光之间的夹角来实现的。具体操作中,有两种可供选择的方法:一是改变参考光的方向,这就要求记录  $H_2$  时多次曝光;二是改变物光的方向。横向面积分割法选择了第二种方法,在图 4-13 中,将不同物体记录在主全息图  $H_1$  的不同横向位置的条形全息图上(如图中  $R$ 、 $G$ 、 $B$ ),这就改变了  $H_2$  记录光路中物光的方向,为不同物体的再现像赋予了不同的颜色。

应用横向面积分割法记录  $2D/3D$  全彩色全息图,其难点和关键点在于记录一张高质量的主全息图  $H_1$ 。对  $H_1$  的主要技术要求是:信噪比高、再现实像像差小、图像清晰、衍射效率高、不同层次和颜色的二维物体亮度均匀。为了实现这些目标,除了掌握好 4.2.4 节中介绍的各种技术诀窍外,背景挡板(Background Blocker)的应用也是关键之一。

不用背景挡板的  $2D/3D$  全息图,背景图像的成像光线叠加在前景图像上,不但降低了再现  $2D/3D$  像的信噪比和体视感,而且使前景图像偏离了设计的颜色分布。背景挡板的应用有效地解决了这一问题。图 4-14 是应用背景挡板的  $H_1$  记录光路。图中  $D$  是毛玻璃散射屏, $O_b$  是背景目标透明片(负件), $B$  是背景图像的正片, $E$  是景深标准环,它的作用除了控制前景和背景间的景深大

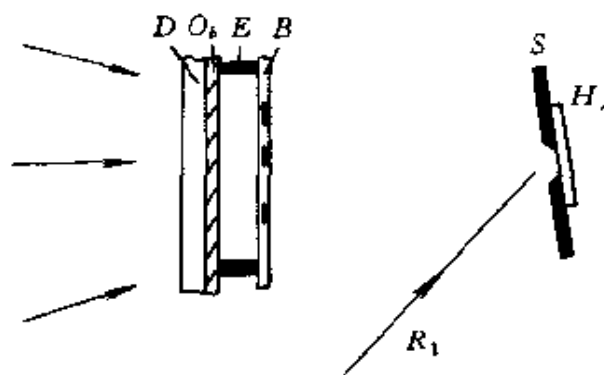


图 4-14 背景挡板的应用

$D$ —毛玻璃; $O_s$ —背景目标透明片; $E$ —景深标准环; $B$ —背景图像正片;

$S$ —狭缝; $H_1$ —主全息图; $R_1$ —参考光。

小,还可以将背景挡板和前景透明片定位在同一平面上。很显然,应用背景挡板后,通过前景图像部分的背景成像光线被阻挡,有效地防止了背景和前景的混叠,同时穿过前景观看背景图案的栅栏效应又大大增强了  $2D/3D$  像的体视感。

在记录  $2D/3D$  全息图时,为了尽量减少全息图再现像的像差, $H_1$  和  $H_2$  的记录最好使用激光的同一种波长。为节省光学元件,方便操作,可将两步记录光路布置在同一防震台上,如图 4-15 所示。其中反射镜  $M$  只在记录  $H_2$  时使用。

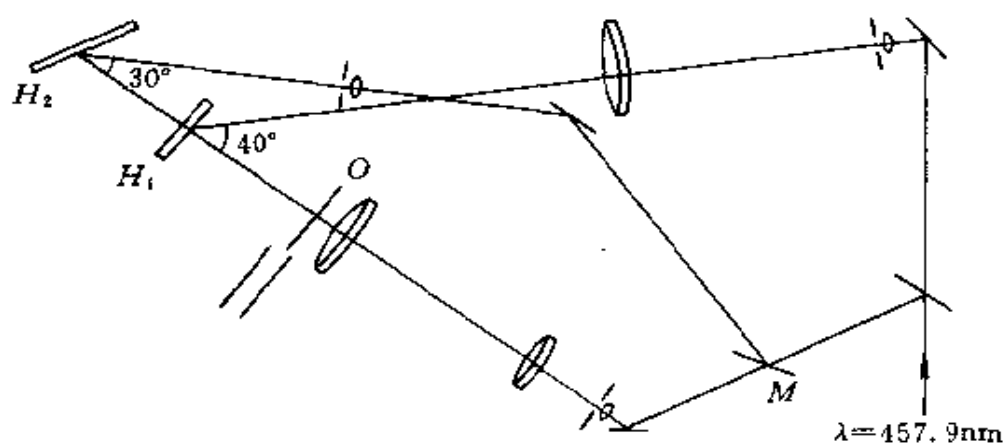


图 4-15 二合一记录光路

$H_1$ —主全息图; $H_2$ — $2D/3D$  全息图; $O$ —物体透明片; $M$ —反射镜。

### 三、用掩模法记录 2D/3D 全息图

#### (一) 由二维景物构成的 2D/3D 全息图的记录

掩模法记录 2D/3D 全息图的背景图像与横向面积分割法基本相同,也是经过两步过程来完成;但记录前景图像则只需一步即

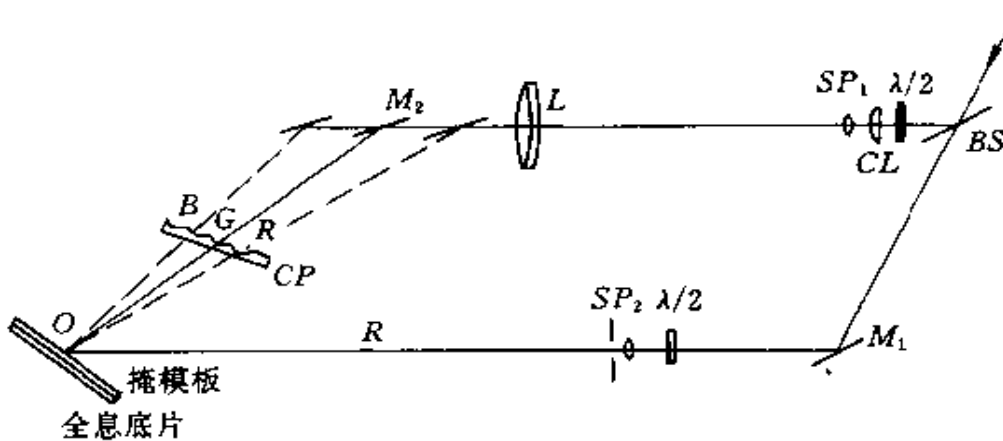


图 4-16 掩模法记录光路

$O$ —物光; $R$ —参考光; $CP$ —柱形散射屏; $R, G, B$ —不同位置的柱面镜;

$M_1, M_2$ —反射镜; $L$ —准直镜; $SP_1, SP_2$ —扩束镜; $CL$ —柱面镜; $BS$ —分束镜。

可完成。图 4-16 是用掩模法记录 2D/3D 全息图前景的光路。图中掩模板是用高反差银盐干版制作的物体图案的负片,记录时将掩模板与全息底片的乳胶面对贴,因此只有图案部分能曝光。物光是由柱面镜  $CL$ , 扩束物镜  $SP_1$  和准直物镜  $L$  组成的线光束系统和柱形散射屏  $CP$  产生的均匀散射光构成;参考光是由  $SP_2$  产生的发散球面波。图中的一对  $\lambda/2$  片是用来将激光束由垂直偏振态变为水平偏振态,以便消除由掩模板二次反射形成的莫尔条纹。由上述可知,掩模法记录的实际上是一幅像平面彩虹全息图,并且从原理图可知,掩模法一步过程只能记录 2D 平面物体。

用掩模法记录多色全息图,不同物体再现像的颜色是通过调节物光的方向面改变全息图的空间频率来实现的。在图 4-16 的光路中,则是通过大平面反射镜  $M_2$  的移动,使线光束依序照射在柱形散射屏  $CP$  的不同柱面镜(如图中的  $R, G, B$ )上来实现的,这和横向面积分割法中将不同物体记录在  $H_1$  上不同条形全息图上有异曲同工之妙。颜色的计算和柱面镜  $R, G, B$  位置的确定可参考文献[4.3]。



用掩模法记录 2D/3D 全息图,可将背景的记录光路(第一步记录  $H_1$ )和 2D/3D 全息图的记录光路(第二步记录  $H_2$ )合为同一个光路,如图 4-17。应用上述光路记录 2D/3D 全息图分两步进行:第一步去掉小反射镜  $m_2$  和线光束系统中的  $\lambda/2$  片,在  $H_1$  上记录背景物体  $O$  的条形全息图。此时参考光是由大平面反射镜

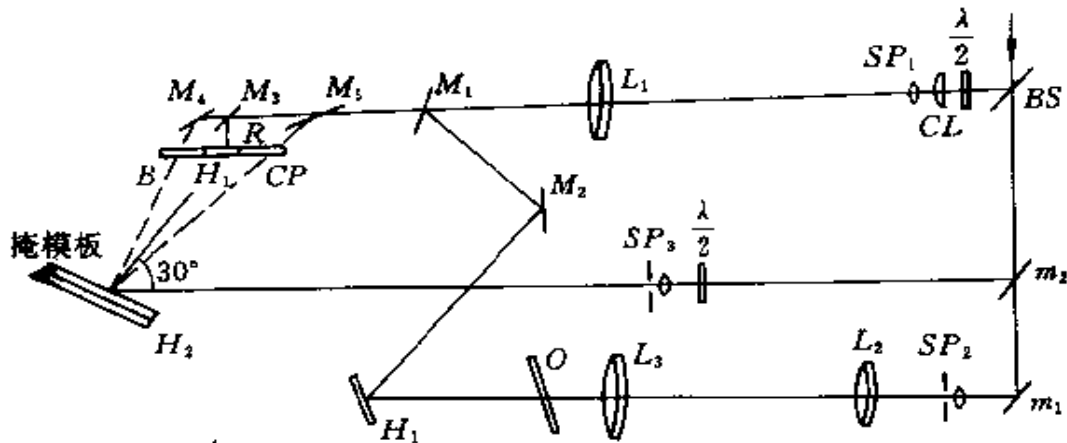


图 4-17 掩模法记录 2D/3D 全息图光路

$M_1$ — $M_2$  反射的线光束;第二步记录  $H_2$ , 装上小反射镜  $m_2$  和  $\lambda/2$  片, 将大平面反射镜  $M_1$  分别移到图中  $M_3 \rightarrow M_4 \rightarrow M_5$  等一系列位置, 在  $H_2$  上分别记录背景图像和不同颜色的前景图像。在多次记录中, 参考光的方向固定不变, 通过改变物光方向来调整不同物体的颜色。背景和前景之间景深的大小, 则是通过调节  $H_2$  底片的纵向位置来控制。值得注意的是, 为了消除背景和前景图像的混叠, 在记录  $H_2$  的背景图像时, 必须在  $H_2$  底片的前面加入背景挡板, 此时背景挡板和前景掩模板应放在相同位置, 只不过前者是正片, 后者是负片而已。

## (二) 三维模型的记录方法

通常, 三维模型的显示全息图除了记录一个或多个三维模型外, 还包含一幅二维背景和一幅二维的前景, 因此在记录时要综合应用前面介绍的各种方法。

由于全息图所记录的是十分精细的干涉条纹, 因此在曝光过程中物体的任何微小移动或振动都会引起干涉条纹的模糊, 使得再现的物体像发暗。因此记录物体质材的选择及固定是十分重要

的步骤。根据作者的经验,烧制的陶瓷,石膏,金属制品,各种石头雕刻,铸造雕刻的树脂工艺品,磨砂并着色的玻璃制品等物体,由于刚性较好,而且对湿度的变化不敏感,是首选的模型材料;木头,骨头,塑料,未经烧制的泥塑,蜡制品,面塑及植物,花朵,绒毛制品等,都不适宜作为全息照相的模型。

除了模型的质材外,它的表面处理也不容忽视。具有镜面光泽的模型是不适宜全息照相的,一方面,照明激光束在镜面部位沿几何光学的方向反射,使  $H_1$  上大部分面积接受不到物光信息,成为盲区,再现时这些区域将看不到再现像或只看见很暗的像,这就大大减小了全息图的视角;另一方面,镜面区域的再现像十分明亮,成为一块块“热斑”,在记录  $H_2$  时,“热斑”会引起光致抗蚀剂过曝光,甚至出现“烧孔”现象。处理光泽表面有两种方法:简单的办法是在表面喷涂一层透明胶,增大散射系数;另一种办法是用广告颜料或无光油漆对表面作精饰处理,使其层次清晰,颜色分明,但要注意一定不要选用与激光光谱色互补的颜色。

模型的安装和固定也是十分考究的艺术,要使再现的三维像看起来像是浮在空中,没有任何支撑或依托。通常可采用胶粘或螺钉固定等方法。如果三维模型固定在一块透明玻璃板上,背后要贴上背景掩模板和毛玻璃,如图 4-18 所示。为了防止物体的振动,透明片架应该和防震台连为一体,为了消除曝光过程中因物体热膨胀引起的条纹移动,可在正式曝光之前用激光束对物体预热  $10\sim 15\text{min}$ 。

图 4-19 是记录三维模型全息图的实用光路。图 4-19(a)是  $H_1$  的记录光路。用此光路既可记录三维模型的  $H_1$ ,又可记录背景图像的  $H_2$ ,例如记录三维模型时,

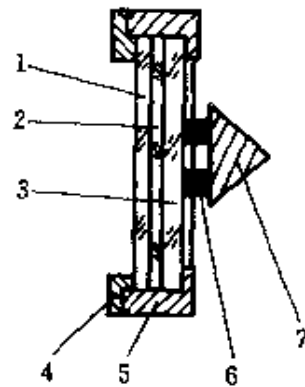


图 4-18 三维模型安装  
1—毛玻璃散射屏;2—背景透明片(负片);3—透明玻璃板;4—压板;5—透明片架;6—支托;7—三维模型。

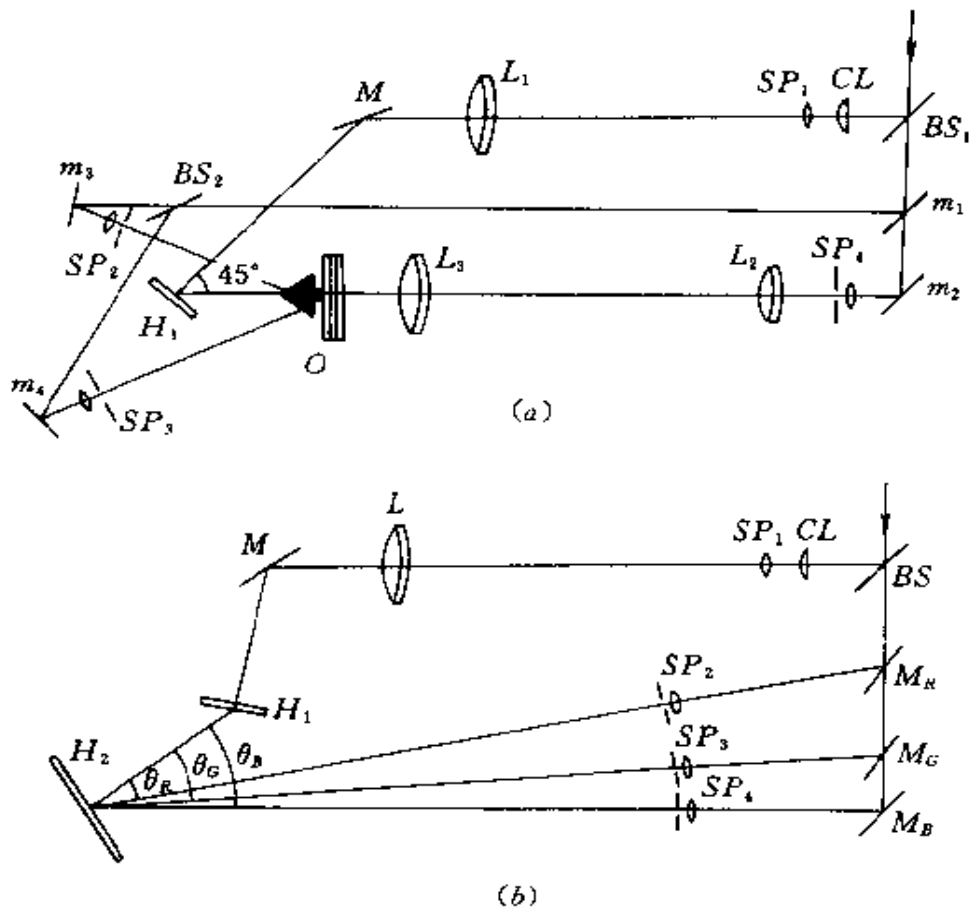


图 4-19 三维模型记录光路

(a)  $H_1$  记录光路; (b)  $H_2$  记录光路。O—物体; BS—分束镜; SP—扩束镜; CL—柱面镜;  $m$ 、 $M$ —反射镜。

通过  $m_1$ — $m_3$ — $m_4$  实现对模型的两个方向反射照明,模型的均匀散射光和大平面反射镜  $M$  反射的线光束干涉,在  $H_1$  上记录了模型的条形全息图。在进行这一步骤时,可用黑丝绒将背景玻璃板挡住,以减小干扰。当记录背景图案时,可去掉  $m_1$ ,通过  $m_2$  产生的会聚光束对二维背景掩模作后向照明,透射的物光与线光束参考光干涉,形成背景图像的  $H_1$ ,从以上叙述可知,在后向照明情况下,三维模型本身起到了背景挡板的作用。当背景图案有多种颜色时,需制造多个背景掩模板,应用上述后向照明光路,每更换一块背景掩模板,曝光一个相应的  $H_1$ 。值得注意的是,不论是三维模型的  $H_1$  还是各种颜色背景图型的  $H_1$ ,都在同一位置记录,  $H_1$  干板架

定位系统保证了各个  $H_1$  的精确复位,因而也保证了三维模型和各种颜色二维背景的重合。更复杂的情形是用单一激光波长记录彩色的三维模型和彩色的二维背景。我们知道,背景的颜色可以通过更换不同的掩模板记录不同的  $H_1$  实现;但三维模型的颜色区分则只有通过用黑白涂料对模型的描绘来实现,即要表现模型上某部位的颜色,则施以白色涂料以增大其散射系数,而对其它部位则施以黑色或灰色涂料,减小散射系数,以记录一个相应的  $H_1$ ;要记录模型上另一种颜色时,则需对模型进行重新描绘,记录另一个  $H_1$ 。

图 4-19(b)是  $H_2$  的记录光路。我们知道,用同一波长激光记录多色全息图不外乎两种方法:一是改变物光的方向;二是改变参考光方向。在记录三维模型全息图时,为了克服物体对准的困难,一般采用改变参考光方向的方法。在图 4-19(b)中,不同的  $H_1$  放在  $H_1$  干板架上同一位置,由定位机构保证精确复位,因而保证了再现像的重合;参考光的方向则由不同的反射镜  $M_R, M_G, M_B$  等来控制。

#### 4.2.6 全息透镜的制造及像差校正

##### 一、全息透镜的成像特性

全息透镜是用干涉方法制成的具有透镜成像功能的衍射光学元件,和普通透镜相比,在成像原理上,它不是基于光的折、反射,而是基于光波的衍射;在结构上,它是由两个点光源干涉形成的基元全息图,通常是平面型的。为了了解全息透镜的成像原理,我们可以写出它的复振幅透过系数。

在图 4-20 的一般记录光路中,相干光源  $A$  和  $B$  在记录平面的复振幅分布可表示为:

$$A(x_A, y_A, z_A) = A_0 e^{iK \left( \frac{x^2 + y^2}{2z_A} \right)} e^{-iK \left( \frac{x_{Ax} + y_{Ay}}{z_A} \right)} \quad (4-13)$$

$$B(x_B, y_B, z_B) = B_0 e^{iK \left( \frac{x^2 + y^2}{2z_B} \right)} e^{-iK \left( \frac{x_{Bx} + y_{By}}{z_B} \right)} \quad (4-14)$$

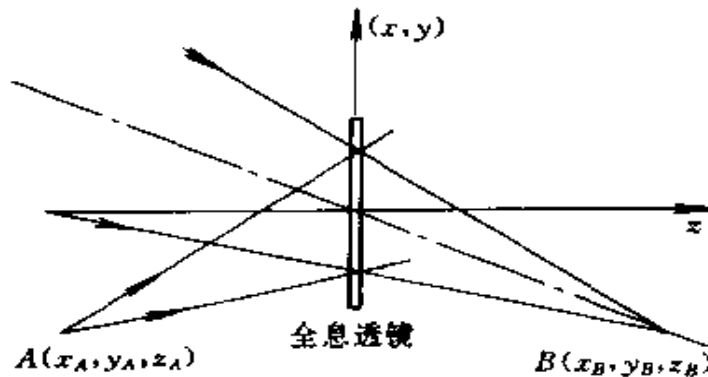


图 4-20 全息透镜记录光路

如果记录过程是线性的,则全息透镜的复振幅透过系数  $\tau_H(x, y)$  为

$$\tau_H(x, y) \propto (|A|^2 + |B|^2) + B^*A + BA^* \quad (4-15)$$

当载频足够高时,这三项在空间是分离的,我们感兴趣的+1级项代表全息透镜的振幅透过系数,表示为

$$\tau(x, y) = B^*A = \tau_0 e^{iK} (\sin\theta_x x + \sin\theta_y y) e^{-iK \left( \frac{x^2 + y^2}{2f} \right)} \quad (4-16)$$

其中  $f = \left( \frac{1}{z_B} - \frac{1}{z_A} \right)^{-1}$  表示全息透镜的焦距。  $\sin\theta_x = \frac{x_B}{z_B} - \frac{x_A}{z_A}$ ,  $\sin\theta_y = \frac{y_B}{z_B} - \frac{y_A}{z_A}$  分别表示衍射光相对于入射光在  $x$  和  $y$  方向的偏转角。二次位相因子  $e^{-iK \left( \frac{x^2 + y^2}{2f} \right)}$  正是一个焦距为  $f$  的薄透镜的位相变换因子,它对入射成像光波起会聚作用。这说明由图4-20所示的光路所记录的两个点光源的基元全息图能像普通透镜那样对物体成像。

## 二、全息透镜的制造工艺

### (一)各种全息透镜的记录光路

图 4-21 是同轴全息透镜的记录光路。不难看出,这样记录的全息透镜实际上是一个同轴菲涅耳波带板,其复振幅透过系数可

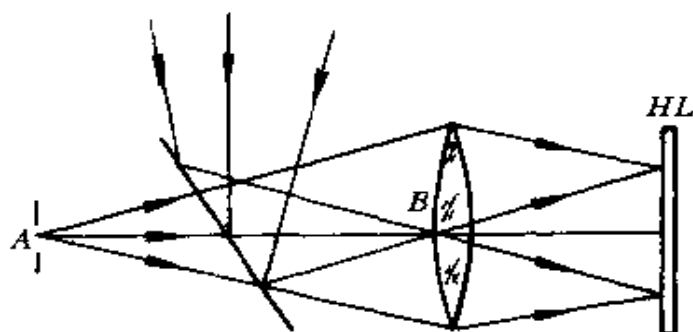


图 4-21 同轴全息透镜记录  
HL—全息透镜；A、B—点光源。

表示为

$$r(x, y) = \tau_c e^{-i\kappa \left( \frac{x^2 + y^2}{2f} \right)} \quad (4-17)$$

图 4-20 是透射型离轴全息透镜的记录光路，图 4-22 是相应的成像光路。该全息透镜焦距  $f > 0$ ，相当于正透镜。图 4-23 是  $f < 0$  的

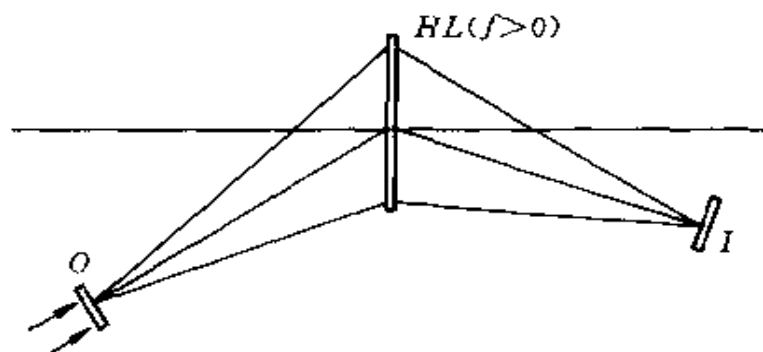


图 4-22 离轴全息透镜成像光路  
O—物体；HL—全息透镜；I—物体像。

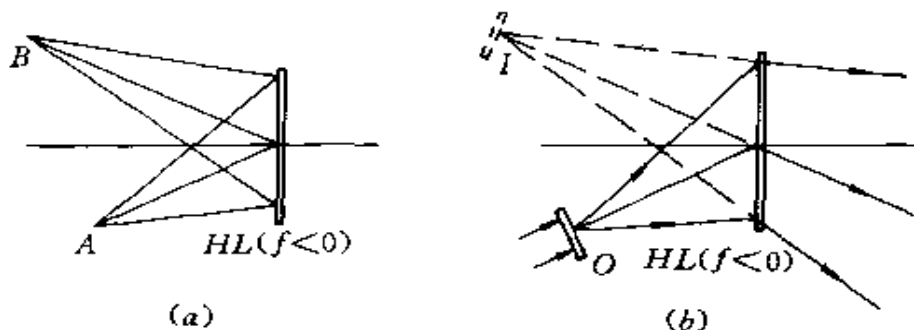


图 4-23 全息透镜 ( $f < 0$ ) 的记录和成像光路  
A、B—点光源；HL—全息透镜；O—物体；I—物体像。

全息透镜记录和成像光路,全息透镜相当于负透镜。图 4-24 是反射式全息透镜的记录和成像光路。全息透镜的成像性能类似一个凹面反射镜。如果用厚乳胶记录,全息透镜是体积型的,可用宽频带的光源成像。图 4-25 是傅里叶变换全息透镜的记录和成像光路。其中 $(x_0, y_0)$ 为物平面。 $(\xi, \eta)$ 为频谱平面。

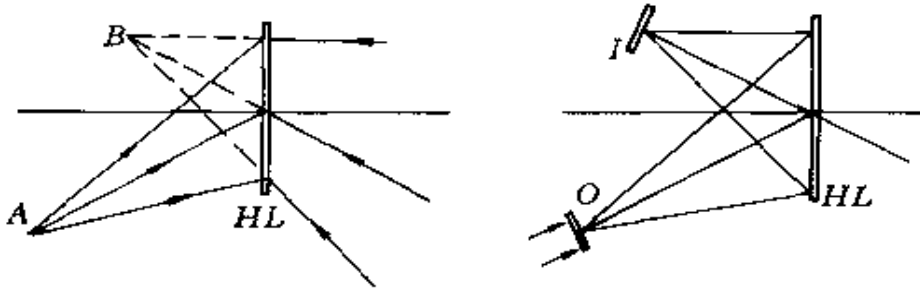


图 4-24 反射式全息透镜的记录和成像光路

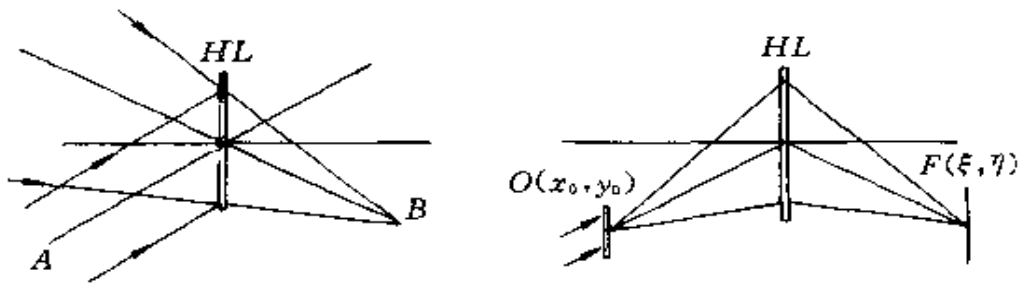


图 4-25 傅里叶变换全息透镜的记录和成像光路

## (二) 全息透镜的记录材料及处理工艺

制造高质量的全息透镜,需使用高分辨率、高衍射效率的位相型记录材料。在实际工作中,硬化的重铬酸盐明胶是目前人们首选的材料。未曝光的重铬酸盐明胶材料不能长期保存,因此没有商品出售,必须由使用者在实验室制备。制备重铬酸盐明胶材料可采用无银明胶干版敏化,浸入法和刀刮法等各种工艺。表 4 2 是刀刮法的配方和工艺规范。

按照正确的工艺方法,制成的重铬酸盐明胶全息透镜其衍射效率可达 90% 以上,分辨率可超过 4000 线/mm。

表 4-2 重铬酸盐明胶制版及处理工艺

1 准备片基	玻璃片基平度为制板级,无油污、划痕、气泡。仔细清洗直到表面不挂水珠,在 120℃ 下烘烤 60min。自然冷却备用
2 配制明胶水悬浮液	在 20℃ 蒸馏水中加入质量比为 40% 的明胶。加热到 70℃ 时恒温,并用磁力搅拌器搅拌 5min
3 加敏化剂	将重铬酸铁 $[(\text{NH}_4)_2\text{Cr}_2\text{O}_7]$ 配制成 10% 水溶液,缓缓加入明胶悬浮液,加入敏化剂的质量为明胶的 0.5%,继续搅拌 5min,用适量正丁醇消除气泡;最后在 70℃ 恒温下过滤备用
4 涂胶	将玻璃片基放在仔细调平的水平台上,倒上适当过量的重铬酸盐明胶溶液,将医用刮刀刀刃间款调到 0.5~1mm,将明胶溶液刮平
5 硬化	在无尘室中放置 24h,令其自然干燥,再在烘箱中 150℃ 温度下烘 60min
6 曝光	在制版后两天之内曝光,感光灵敏度参考值: $\lambda=441\text{nm}, E=5\sim 8\text{mJ}/\text{cm}^2$ $\lambda=488\text{nm}, E=30\sim 50\text{mJ}/\text{cm}^2$
7 显影	(1)在 20℃ 流水中浸泡 10min。 (2)在 50% 异丙醇中搅动浸泡 2min。 (3)在 90% 异丙醇中搅动浸泡 2min。 (4)在 100% 异丙醇中浸泡 10~20min。 (5)从异丙醇中以 1~2cm/min 的速度慢慢拉出,同时立即用热空气将明胶吹干

### 三、全息透镜的像差校正

由全息学原理可知,仅当物体点和记录点光源重合时,才能得到无像差的像点。由于全息透镜对扩展物体成像,大多数物点会因偏离记录条件而带来严重的单色像差。另一方面,全息透镜成像基于衍射原理,像点位置是波长的函数,因此全息透镜具有比普通透镜大得多的色差。

普通透镜的单色像差和色差可通过改变曲率半径、材料折射率、厚度、透镜间隔、光阑位置及多片组合等手段来校正;而用两个点光源记录的全息透镜可供调整的参数则很少。下面我们介绍校正全息图单色像差和色差的一些有效的方法。



## (一) 计算机原生全息透镜

为了增加全息透镜用于像差校正的自由度, J. R. Fienup(美)提出了用计算机全息图产生非球面波来记录全息透镜的方法。如图 4-26 所示: 全息透镜由理想球面波  $\Sigma_B$  和由计算机全息图 (CGH) 产生的非球面波  $\Sigma_A$  记录。  $\Sigma_B$  在全息透镜上的位相分布为  $\phi_B(x, y)$ ,  $\Sigma_A$  的位相分布为  $\phi_A(x, y)$ , 可用一个多项式来表示

$$\phi_A(x, y) = \frac{2\pi}{\lambda} \sum_{i=0}^p \sum_{j=0}^q C_{ij}(x_0, y_0, x_I, y_I) x^i y^j \quad (4-18)$$

其中  $C_{ij}$  为待定系数, 它是物点坐标  $(x_0, y_0)$  和像点坐标  $(x_I, y_I)$  的函数。设成像光路中物点  $O(x_0, y_0)$  和对应理想像点  $I(x_I, y_I)$  在全

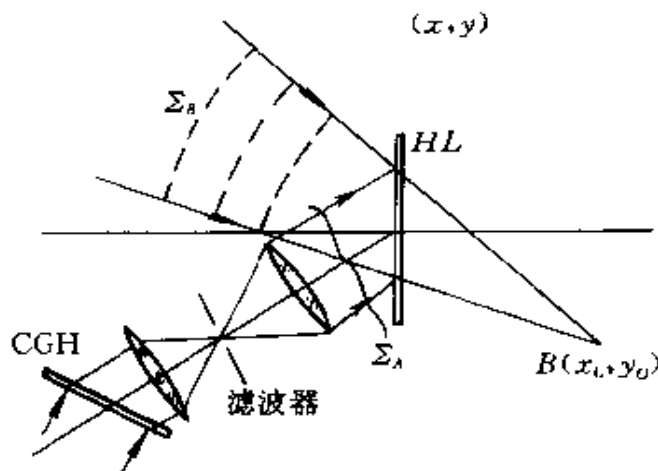


图 4-26 用非球面波记录全息透镜

CGH—计算机全息图; HL—全息透镜;  $B(x_0, y_0)$ —单色点光源;

$\Sigma_A$ —非球面波;  $\Sigma_B$ —理想球面波。

息透镜上的位相函数为  $\phi_O(x, y)$  和  $\phi_I(x, y)$ , 于是全息透镜的波差为

$$w(x, y) = \frac{\lambda}{2\pi} [\phi_O(x, y) - \phi_I(x, y) + \phi_B(x, y) - \phi_A(x, y)] \quad (4-19)$$

应用迭代算法, 调整  $\phi_A(x, y)$  的系数  $C_{ij}$ , 使波差  $w(x, y)$  的均方值趋于最小, 可得到最优化的非球面波的波函数  $\phi_A(x, y)$ 。最后应用下节介绍的方法, 设计一个计算机全息图来产生这个非球面波

$\Sigma_A$ , 这样得到的消色差全息透镜称为计算机原生的全息透镜。

## (二) 全息透镜色差的校正

1. 全息透镜的色差是由自身光栅结构对入射光波的色散引起的。全息透镜的光焦度为

$$F = \frac{1}{f'} = \frac{\lambda}{\lambda_0} \left( \frac{1}{z_B} - \frac{1}{z_A} \right) \quad (4-20)$$

其中  $\lambda_0$  和  $\lambda$  分别是记录和成像的光波长。于是全息透镜的色散可用色散率表示

$$D = \frac{\Delta F}{F} = \frac{\Delta \lambda}{\lambda} \quad (4-21)$$

## 2. 色差的校正方法

### (1) 正负全息透镜双分离消色差

双分离组合系统消色差原理如图 4-27 所示。正透镜  $HL_1$ , 记录波长为  $\lambda_1$ , 光焦度  $F_1$ ; 负透镜  $HL_2$ , 记录波长为  $\lambda_2$ , 光焦度  $F_2$ , 间

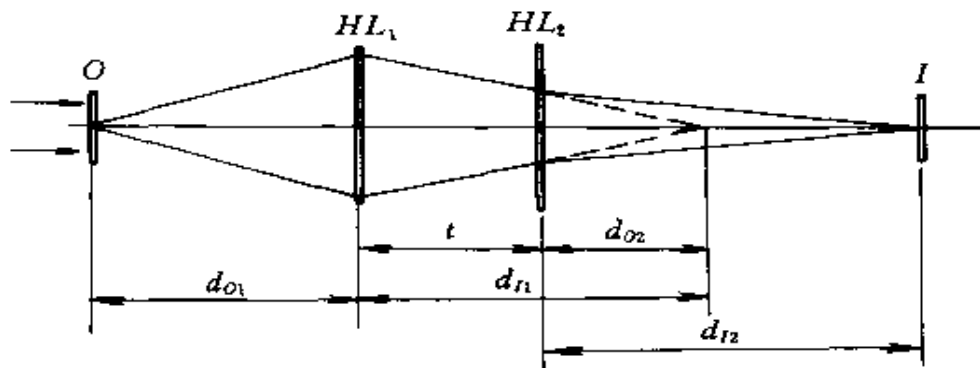


图 4-27 双分离正负透镜消色差

O—物体;  $HL_1$ 、 $HL_2$ —全息透镜; I—物体像。

隔为  $t$ , 成像光波长为  $\lambda$ 。系统总光焦度为

$$F = F_1 + F_2 - tF_1F_2 = \frac{\lambda}{\lambda_1} \left( \frac{1}{z_{B_1}} - \frac{1}{z_{A_1}} \right) + \frac{\lambda}{\lambda_2} \left( \frac{1}{z_{B_2}} - \frac{1}{z_{A_2}} \right) - t \frac{\lambda^2}{\lambda_1 \lambda_2} \left( \frac{1}{z_{B_1}} - \frac{1}{z_{A_1}} \right) \left( \frac{1}{z_{B_2}} - \frac{1}{z_{A_2}} \right) \quad (4-22)$$

利用对总光焦度消色差的条件

$$\lambda = \frac{\partial F}{\partial \lambda} = F_1 + F_2 - 2tF_1 \cdot F_2 = 0 \quad (4-23)$$

可得横向消色差条件

$$t = \frac{F_1 + F_2}{2F_1F_2} = \frac{f'_1 + f'_2}{2} \quad (4-24)$$

但是上述条件不能消除纵向色差。因为尽管总光焦度不随波长变化,但因组合系统的主平面随波长变化,因此焦平面仍会随波长变化。为了得到组合系统消色差的条件,必须要考虑  $HI_2$  的像距  $d_{I_2}$  不随波长  $\lambda$  变化。利用全息物像关系式和组合系统光路,得出组合消色差条件:

$$\frac{\partial \left( \frac{1}{d_{I_2}} \right)}{\partial \lambda} = \frac{d_{I_1}^2}{d_{O_2}^2} \cdot \frac{F_1}{\lambda} + \frac{F_2}{\lambda} = 0 \quad (4-25)$$

或

$$\begin{cases} d_{I_1}^2 F_1 = -d_{O_2}^2 F_2 \\ d_{O_2} = d_{I_1} - t \end{cases} \quad (4-26)$$

这个条件虽然是对同轴全息透镜导出的,但也适用于离轴全息透镜。如果采用正透镜在前,负透镜在后的组合 ( $F_1 > 0, F_2 < 0$ ), 则

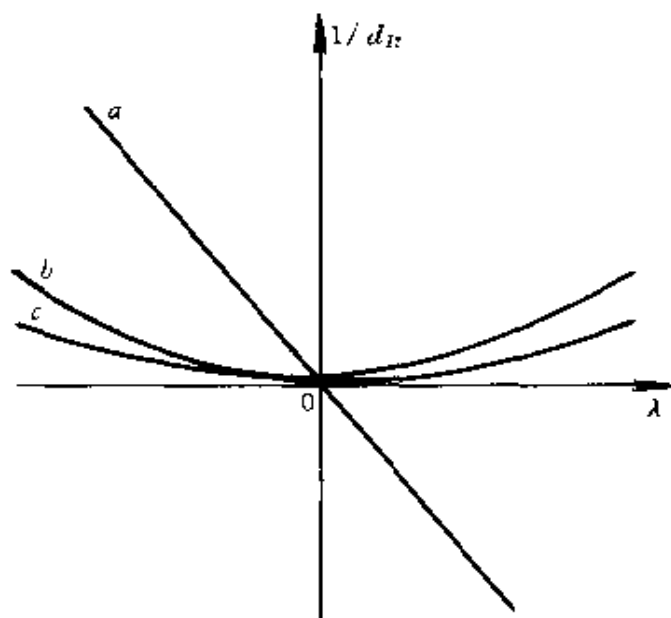


图 4-28 组合系统色差曲线

要求  $d_{i1} > d_{o2}$ ; 如果想成一个实像, 则由  $d_{i2} > 0$  的条件可导出  $d_{o2} < -f_2$ 。图 4-28 给出了几种不同组合的色差曲线。其中曲线 *a* 是单片全息透镜的色差曲线; *b* 是双分离组合, 正透镜在前,  $F_1 = 12.45$  屈光度, 负透镜在后,  $F_2 = -43.2$  屈光度时的色差曲线; *c* 是负透镜在前,  $F_1 = -80.45$  屈光度, 正透镜在后,  $F_2 = 23.17$  屈

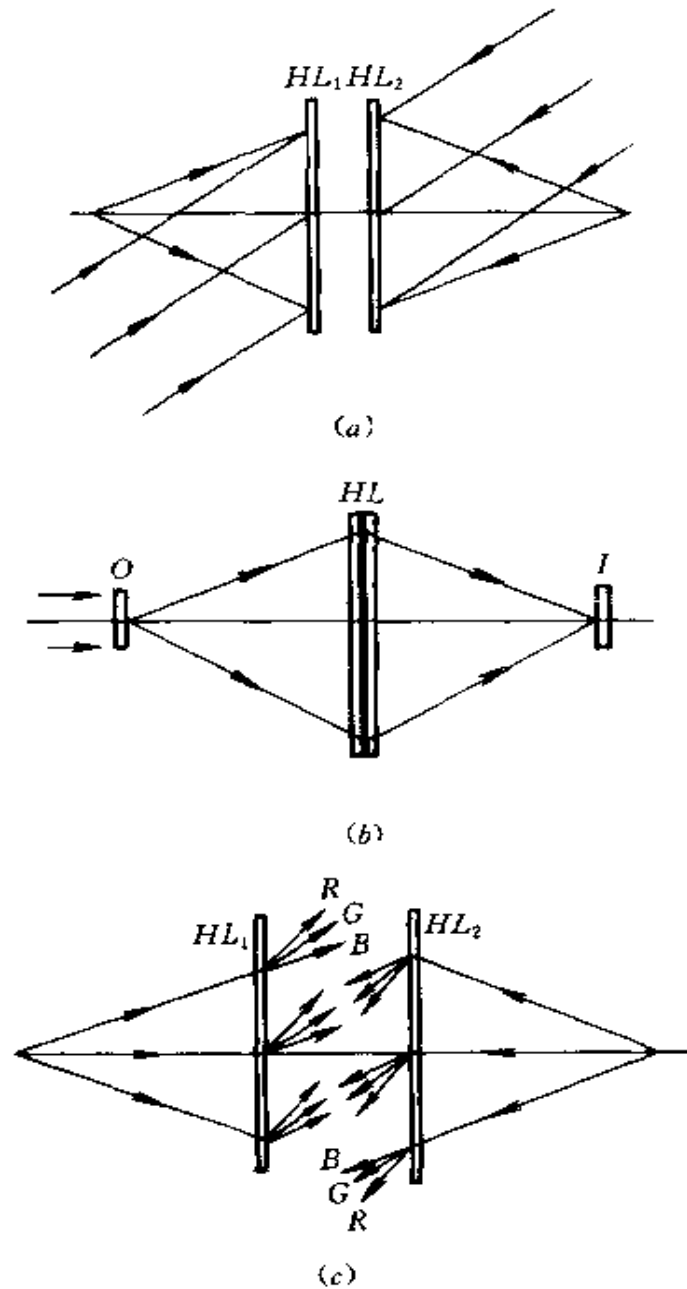


图 4-29 双片密接消色差

(a)消色差全息透镜记录; (b)消色差全息透镜组合; (c)消色差原理。

光度时的色差曲线。 $b, c$  两种组合都可对窄带光源成像。

### (2) 双片透镜密接触消色差

采用图 4-29(a) 的光路记录两个全息透镜  $HL_1$  和  $HL_2$ , 然后按图 4-29(b) 的方式密接触组合。由图 4-29(c) 可以看出, 此时  $HL_1$  和  $HL_2$  的色散大小相等, 方向相反, 因而当用窄带光源照明时可形成一个消色差的像。实际上从公式(4-22)看出, 因间隔  $t=0$ , 总光焦度  $F=F_1+F_2$ , 系统色差用色散率表示为  $D = \frac{\Delta F_1}{F} + \frac{\Delta F_2}{F}$ , 由于  $\Delta F_1 = -\Delta F_2$ , 所以系统的色差为零。

类似的色差补偿原理也可用于双分离系统, 如图 4-30 所示。该系统中全息透镜  $HL$  的色差可用一个空间频率相同的全息光栅  $HG$  来补偿。

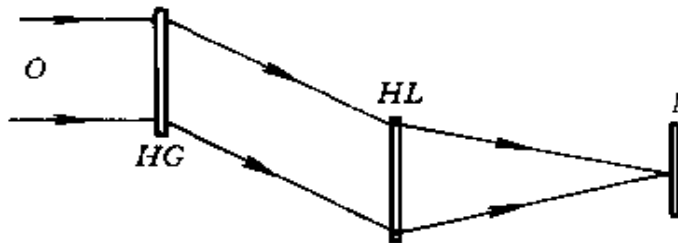


图 4-30 色差的光栅补偿

$HG$ —全息光栅;  $HL$ —全息透镜;  $O$ —物光;  $I$ —物体像。

## 4.3 全息图和全息光栅的模压生产技术

### 4.3.1 全息图和全息光栅的复制技术综述

全息图和全息光栅的复制是全息术的重要组成部分, 是全息术从实验室走向实用的关键技术。正如历史上印刷术的发明, 解决了信息资料的传播, 刻划光栅复制技术的发明促进了光谱仪器的发展一样, 全息图的复制技术解决了它的大规模生产问题, 催生了现代社会一个新兴的产业——全息制品工业。已经出现的复制技术可概括为以下几种。

### 一、二次记录法

首先记录一个全息图  $H_1$ ，第二步用  $H_1$  的再现像作为物，通过与参考光的干涉，复制新的全息图  $H$ 。二次记录法本质上仍然是两束光干涉，因此必须用激光作光源。按照记录要求的不同，又可分为单光束复制法和双光束复制法。图 4-31(a) 是透射全息图的单光束复制光路。图 4-31(b) 是反射全息图的单光束复制光路。

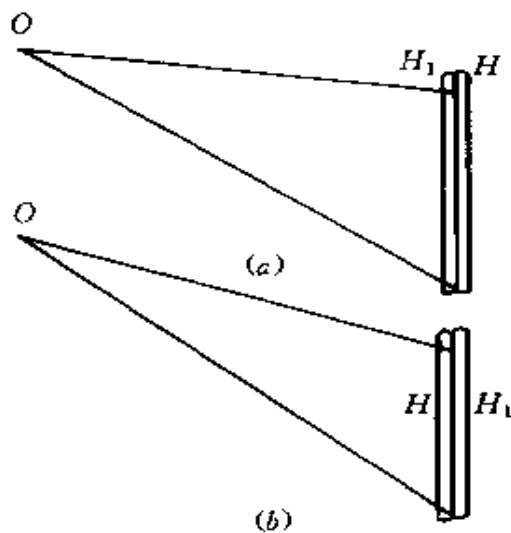


图 4-31 单光束复制光路

(a)复制透射全息图；(b)复制反射全息图。

图 4-32 是双光束复制光路。值得注意的是，单光束记录光路只能复制出和  $H_1$  同类型的全息图，而双光束光路则可以实现不同类

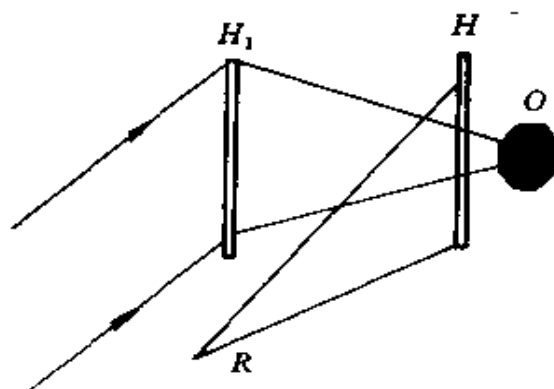


图 4-32 双光束复制光路

(a)透射全息图复制光路；(b)反射全息图复制光路。

型全息图的复制,例如将菲涅耳全息图复制为像平面全息图、彩虹全息图或者反射全息图。

## 二、拷贝法

首先记录主全息图  $H_1$ ,然后利用真空吸附装置,使主全息图和全息底片的乳剂层紧密贴合,用非相干光曝光,通过显影,复制出和  $H_1$  同种类型的全息图。值得注意的是,拷贝法复制工艺中, $H_1$  必须是振幅型全息图或全息光栅,起掩模板的作用,其过程和集成线路板生产过程中的光刻类似,这种复制方法在计量光栅的生产中广泛应用,英国应用全息公司(Applied Holographics of Britain)研制的全息复制机已经商品化,能以很高的速度进行拷贝复制。

## 三、铸塑法

在本章 4.3.4 中将更详细地介绍这种工艺方法。值得提出的是,铸塑法也完全适用于各种浮雕型全息图和全息光学元件的复制。

## 四、光刻法

光刻法和拷贝法的前几个步骤基本相同。差别在于,光刻法适用于将光栅或全息图制作在玻璃、石英或硅片等毛坯材料上。所以首先需要在加工好的毛坯上涂上一层厚度合适的光致抗蚀剂,然后通过掩模片进行光刻,再经过显影,离子刻蚀(或化学腐蚀)等工艺过程,就得到了制作在硅片、石英或玻璃片基上的全息图或全息光学元件。

## 五、模压复制法<sup>[4.4]</sup>

模压复制工艺具有许多特点。首先,它特别适合大规模工业化生产,因为模压复制工艺和凸版印刷类似,可以连续生产。目前最先进的紫外模压机的生产速度可达 50m/min 左右。第二,全息图的模压复制以廉价的塑料片基作为复制材料,用白光显示,不仅具有使用、携带、保存方便和造价低,便于推广的优点,而且经过光学加密和特殊的材料处理,可具备极好的防伪功能。所以,近年来模压全息图在商标证件防伪、包装装潢和工艺品方面得到了广泛的

应用。

模压复制法包括三个基本工艺过程,即全息照相、电铸和模压。全部流程如图 4-33 所示。

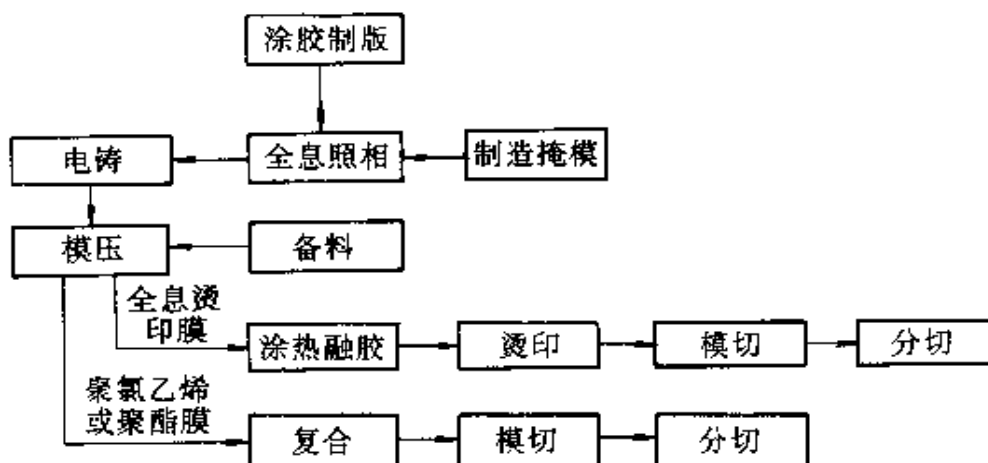


图 4-33 模压全息图工艺流程

#### 4.3.2 浮雕全息图的记录<sup>[4.5.4.6]</sup>

为了满足模压复制的要求和实现白光再现,原始的全息图必须是浮雕位相型的,而且应当记录成彩虹全息图或像平面全息图等类型的白光再现全息图。

制造浮雕全息图必须采用浮雕型记录材料和工艺。现有的浮雕记录材料有各种光致抗蚀剂、光导热塑料膜、重铬酸明胶以及应用物理显影的卤化银乳胶等。但目前应用最广泛的还是光致抗蚀剂。光致抗蚀剂分为正性和负性两类,浮雕全息图记录使用正性光致抗蚀剂。

正性光致抗蚀剂属于重氮类感光材料。它的感光剂是邻重氮萘醌磺酸酯,最灵敏的吸收波段是在 340~440nm 之间。曝光之后,高曝光区的感光剂发生分解,放出氮气形成烯酮,遇水即生成茛羧酸,易溶于稀碱溶液;未曝光区则由于碱的作用,重氮化合物发生偶合反应生成偶氮化合物而难溶于显影液。在 NaOH 溶液之类的显影液中,曝光区和非曝光区的溶解度可相差  $10^3$  倍。因此,用干涉图形曝光并经显影之后可形成浮雕图形。

目前广泛用于全息图记录的光致抗蚀剂有 AZ-1350, AZ-



1400, PR-913 以及 BP-212 等几种型号, 它们在性能和价格上都有很大差异, 下面以 Shipley 公司生产的 AZ-1400-27 为例, 介绍光致抗蚀剂的工艺规范(见表 4-3)。

表 4-3 AZ-1400-27 光致抗蚀剂工艺规范

操作步骤	工艺规范
1. 准备片基	将经过检验的制版玻璃片基在硫酸洗液中浸泡 12h; 自来水冲洗干净; 用中性洗液擦洗表面; 用去离子水冲洗。如果表面仍有水珠, 重复用中性洗液擦洗, 去离子水冲洗, 直到将片基垂直放置时表面挂不住水珠为止。放入烘箱烘至 120℃, 20min, 自然冷却备用
2. 配胶	根据需要的胶层厚度, 用专用稀释剂按一定比例对原胶稀释, 稀释剂比例通常在 1:1~2:1 之间
3. 涂胶	采用离心涂布法, 根据实测的转速—膜厚曲线, 通过控制离心机转速, 使膜厚在 1~10μm 之间
4. 软烘	控制在 65℃, 30min
5. 曝光	达到最大衍射效率的曝光量是 $\lambda=441.6\text{nm}$ $E=7\sim10\text{mJ}/\text{cm}^2$ $\lambda=457.9\text{nm}$ $E=70\sim100\text{mJ}/\text{cm}^2$
6. 显影	推荐用 AZ-303 显影液, 去离子水 4:1 稀释, 温度 21℃±1℃, 显影时间 2~10s。或者用 0.8%~1.2% 的 NaOH 溶液, 显影条件同前。显影后迅速用去离子水冲洗干净。令其自然干燥, 或用离心机甩干
7. 坚膜	在烘箱中烘到 65℃, 30min

#### 4.3.3 螺纹光栅装饰材料的原版制造工艺<sup>[4.7]</sup>

螺纹光栅是一种历史悠久, 至今仍广泛应用的装饰材料。由于它和模压全息图具有相似的微观结构, 决定了二者在制造工艺上的一致性。由于螺纹光栅的制造以及在装饰艺术上的应用已有 100 多年历史, 因此可以说, 近十多年发展起来的模压全息图制造工艺在很多方面正是借鉴了传统的螺纹光栅工艺而形成的。

螺纹光栅装饰材料的基本单元是螺纹光栅(Spiral Grating)

或环形光栅(Circular Grating)。无论是螺纹光栅还是环形光栅,都要求它对可见光在比较大的入射角范围内具有理想的衍射性能,以便在宽广的视角范围能观察到明亮的光谱色和满意的装饰效果。为此,就要求光栅具有恒定的空间频率。下面利用光栅方程来求出最佳的光栅空间频率。

图 4-34 是具有对称槽形的光栅,为简化起见,设入射角等于衍射角,于是光栅方程简化为

$$2\sin\theta = m\lambda f$$

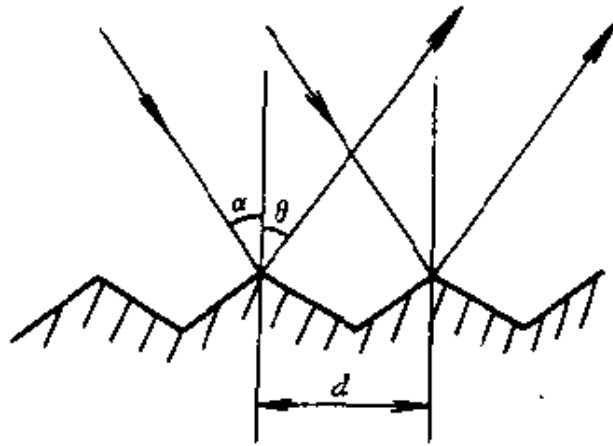


图 4-34 光栅的衍射

我们把  $\lambda=0.7\mu\text{m}$  的红光第  $m$  级衍射角  $\theta_m \leq 90^\circ$  作为计算光栅最佳空间频率  $f$  的依据,由光栅方程可算出,当

$$m = 4 \text{ 时, } f = 714 \text{ 线/mm}$$

$$m = 5 \text{ 时, } f = 571 \text{ 线/mm}$$

$$m = 6 \text{ 时, } f = 476 \text{ 线/mm}$$

进一步分析计算可知,当  $f=714$  线/mm 时,在整个视场范围可观察到的衍射级只有 4 级,彩色变化不够丰富,并且还有缺级现象,也就是说在  $\theta=15^\circ$  附近根本就没有可见光衍射。当  $f=476$  线/mm 时,虽然可观察的可见光衍射级多达 6 级,但各衍射级之间光谱重叠区域过宽,以致在很多视角方向都看到合成后的效果。通过以上分析可知,将装饰性螺纹光栅的空间频率取为 600 线/mm 是最佳的选择。

制造光栅装饰材料,浮雕型原版光栅的生成是至关重要的,下

面介绍几种现代生产工艺。

### 一、刻划法

用刻划机刻划制造光栅仍然是制造浮雕型母光栅的基本方法,特别是空间频率小于 1200 线/mm 的平面直线光栅和圆光栅,用刻划法容易精确控制槽形,可以得到十分理想的结果。

### 二、全息法

空间频率为 600 线/mm 的环形光栅也可以用全息照相的方法来产生。

图 4-35 是记录环形光栅的一种光路,图中锥形棱镜  $G$  顶角为  $(180^\circ - 2\alpha)$ 。为了记录浮雕型光栅,用波长  $\lambda = 0.4\mu\text{m}$  的平行光照明,经锥形棱镜偏折后,与光轴对称的两束光在光致抗蚀剂版  $P$

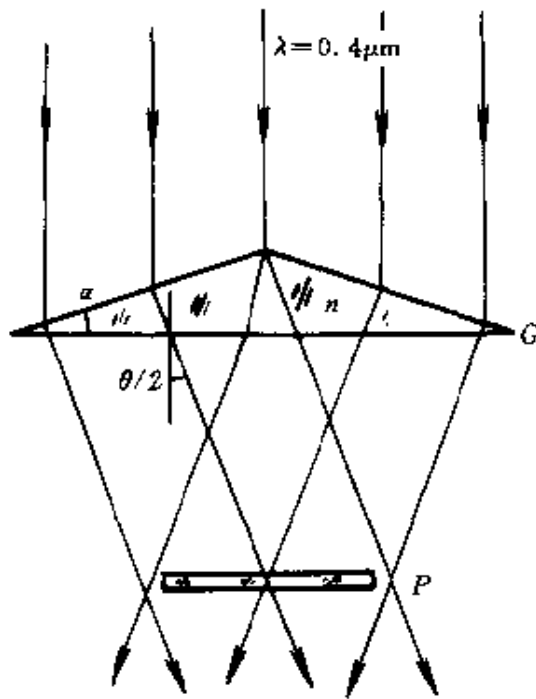


图 4-35 用锥形棱镜记录环形光栅

上产生环形干涉条纹。设环形光栅空间频率  $f = 600$  线/mm,锥形棱镜折射率  $n = 1.51$ ,求出  $\alpha = 15.2^\circ$ 。该方法的关键是锥形棱镜的制造。为了克服制造大尺寸锥形棱镜的困难,可以用另一种更简单可行的光路,如图 4-36 所示, $G$  是具有全内反射表面的圆筒, $B$  为挡板, $P$  为光致抗蚀剂板。 $s$  为  $\lambda = 0.4579\mu\text{m}$  的相干点光源, $s$  发出

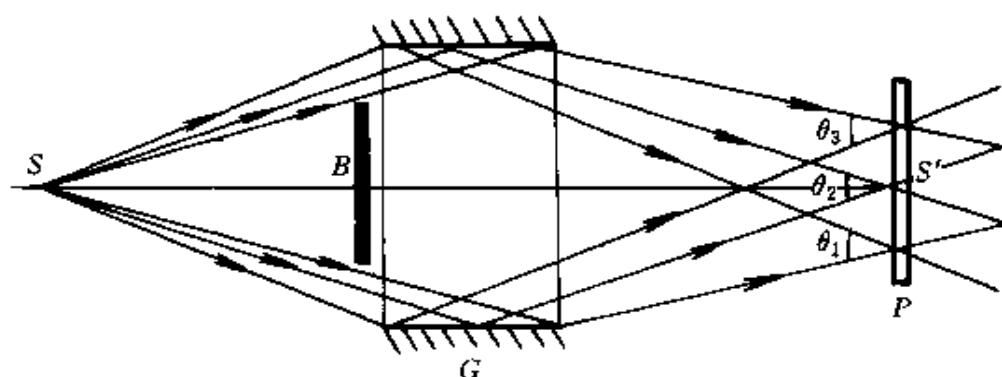


图 4-36 用柱面反射镜记录环形光栅

的发散球面波经  $G$  内反射之后,与光轴对称的两条光线在  $P$  处产生干涉。应用简单的几何关系,很容易证明,干涉角  $\theta_1, \theta_2, \theta_3$  相等,因此干涉条纹的空间频率处处相等,通过调整点光源  $s$  的距离,很容易得到 600 线/mm 的空间频率。这一光路解决了空间锥体棱镜制造的困难,但带来中心部分光能损失的新问题。为此设计了图 4-37 的更实用的记录光路。此光路中,直射光和反射光干涉。只要精确调节干板  $P$  的位置,可保证干涉角  $\theta_1, \theta'_1, \theta_2, \theta'_2$  等处处相等,得到恒定空间频率的环形光栅。

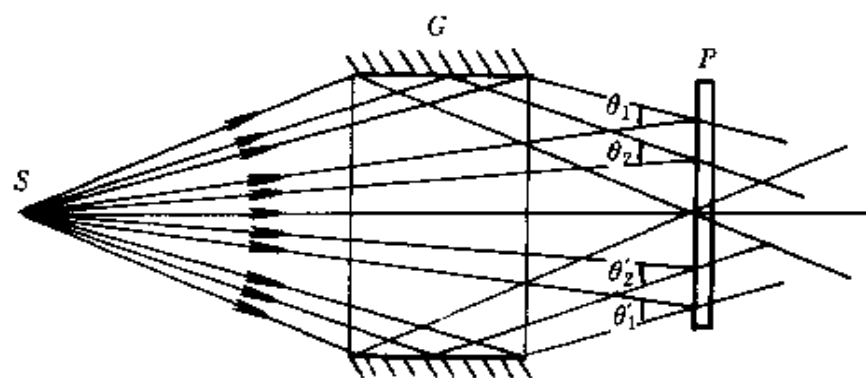


图 4-37 改进的环形光栅记录光路

### 三、CAD 法

由于装饰用的螺纹光栅或环形光栅的空间频率不高,完全可以利用计算机辅助设计及绘图功能来产生。较为简单的作法是,按一定的放大倍率在纸上绘制螺纹光栅或环形光栅,通过照相缩版制成空间频率为 600 线/mm 的黑白掩模板,最后通过光刻,在光致抗蚀剂板上产生浮雕型光栅。更先进的方法是,利用计算机控制

的图形发生器或光绘仪,直接在银盐干板上以 1:1 的比例绘制螺旋纹光栅或环形光栅。

得到螺旋纹光栅或环形光栅的单元图案,还不能用来大批量生产,还必须通过复杂的拼版工艺,将这些单调的单元图案模切成适当的形状,拼接成大面积的具有各种复杂结构的马赛克式衍射图案。传统的工艺需要一套十分精密的拼版设备。首先将单元螺旋纹光栅或环形光栅通过电铸、模压,重复转印在塑料薄膜上,然后模切成不同形状的小块,最后在拼版设备上拼接成马赛克式衍射图案。目前许多研究机构正在研究用计算机拼版,即利用计算机的图形功能,直接对绘制好的单元图案进行切割、旋转、平移,拼接出理想的衍射图案,不仅节省了大量人力物力,也提高了拼版的精度,消除了拼缝的影响。

#### 4.3.4 金属模板的电铸工艺<sup>[4.8.4.9]</sup>

在模压全息图的大规模工业化生产中,全息金属模板的制造是至关重要的工艺环节。记录在光致抗蚀剂上的浮雕型干涉条纹,其空间频率通常高于 1000 线/mm,而沟槽的平均深度仅有光波长的 1/4 甚至更少。要将这样精细的微结构真实地转移到金属镍的表面,制成高质量的可以反复压印的全息金属模板,其难度之大是可以想像的,而电铸(Electroforming)工艺则可以完全胜任这一要求。

由于电铸能复制出芯模上微细的结构,精密的尺寸,复杂的形状,并且能反复拷贝出一大批工作零件,因此在唱片、光盘、波导管、精密模具的制造中得到了广泛的应用。

从光致抗蚀剂浮雕全息图到电铸金属模板要经过生成导电层、电铸母板、拷贝工作板等各个工艺环节。

##### 一、生成导电层

由于制造全息金属模板属于非金属电铸,所以第一步需要对光致抗蚀剂全息图进行表面改性处理,即在全息图表面形成一层金属导电层,以便进行电沉积。除此之外,金属导电层还对全息图

的浮雕微结构进行了复制。

首先要对芯模表面进行除油处理。由于光致抗蚀剂易溶于碱溶液,所以除油应在中性洗涤剂溶液中进行。

由于光致抗蚀剂属于非活性材料,在利用催化还原生成导电层之前,应对表面进行敏化和活化处理:在5%的氯化亚锡溶液中浸渍1min,随后经过水洗,使表面吸附的敏化剂水解为碱性氯化亚锡,形成均匀分布的活化中心。敏化后的表面继续在0.02%~0.1%的氯化钯盐溶液中进行10~20s活化处理,氯化钯在二价锡离子作用下还原为金属钯,在随后的还原反应中起到催化作用。值得指出的是,敏化和活化可在含有氯化亚锡,盐酸和氯化钯的混合溶液中同步完成。此外,由于二价锡离子对银离子也具有还原作用,故在采用化学镀银生成导电层的工艺中无需使用氯化钯进行活化处理。

金属导电层的生成通常采用化学还原反应,即化学镀膜。最常用的是化学镀银和化学镀镍。

#### (一)化学镀银

化学镀银配方很多,但一般资料上介绍的化学镀银溶液稳定性差,不适合光致抗蚀剂全息图表面导电层的形成。我们通过实验设计了以下配方和工艺规范(见表4-4)。

表 4-4 化学镀银配方及工艺规范

化学成分及 工艺参数		分子式	浓度/(g/L)	参 数 值
A 液	硝酸银	AgNO <sub>3</sub>	4	
	氢氧化钠	NaOH	7	
	氨水	NH <sub>4</sub> OH	适量	
B 液	葡萄糖	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O <sub>6</sub>	10	
	稳定剂		0.1	
工 艺 参 数	温度			5℃~10℃
	时间			5~10min

操作时,将温度在  $5^{\circ}\text{C}\sim 10^{\circ}\text{C}$  的 A 液和 B 液以 1:1 比例混合,搅拌,待观察到还原反应开始时(溶液出现淡褐色),立即将经过预处理的全息图浸入溶液中,并不断搅拌,经  $5\sim 10\text{min}$ ,全息图表面即镀上一层均匀的银膜。

化学镀银也可采用液雾法进行喷镀,表 4-5 给出了相应的溶液配方和工艺规范:

表 4-5 液雾法喷银溶液配方及工艺规范

化学成分及 工艺规范		分子式	浓 度
A 液	硝酸银 氨水	$\text{AgNO}_3$ $\text{NH}_4\text{OH}(25\%)$	240g/L 375mL/L (配成 1L)
B 液	氢氧化钠 氨水	$\text{NaOH}$ $\text{NH}_4\text{OH}(25\%)$	134g/L 140mL/L (配成 1L)
C 液	葡萄糖 甲醛	$\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$ $\text{HCOH}(40\%)$	80g/L 32mL/L(配成 1L)
工 艺 规 范	银盐工作溶液:取 30mLA 液和 30mLB 液加入 1L 去离子水。 还原剂溶液:取 30mLC 液加入 1L 去离子水。 喷镀压力:0.3~0.4MPa。 温度:室温。		

液雾法喷银可以采用双喷嘴的喷枪,也可采用单喷嘴喷枪。差别在于:用双喷嘴时,银盐溶液和还原剂在被镀件表面混合;而采用单喷嘴时,银盐溶液和还原剂在混液室均匀混合,然后均匀喷射到工作表面,因而反应速度更快,镀层更均匀。图 4-38 是采用单喷嘴喷枪的喷银装置示意图。银盐溶液和还原剂在压缩空气作用下进入浮珠式流量计,由控制阀调节两种溶液的比例。两种液体在控制阀内均匀混合后从喷嘴高速喷出。喷嘴的结构使溶液散射为扇面形状的液雾,保证了镀层均匀。

## (二)化学镀镍

化学镀镍的工艺和化学镀银类似,因此这里只给出镀镍溶液

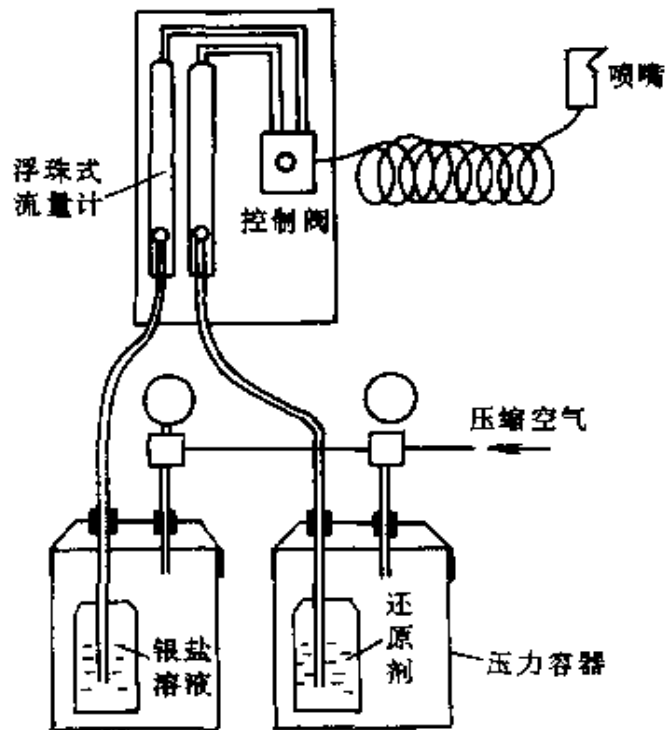


图 4-38 喷银装置

的化学配方。化学镀镍根据镍盐、还原剂、缓冲剂和络和剂的不同，有不同的配方和工艺，这里给出一种适合在光致抗蚀剂上应用的常温操作的酸性化学镀镍溶液配方(见表 4-6)。

表 4-6 常温酸性化学镀镍溶液配方和工艺条件

化学成分		功能	浓度/(g/L)
氯化镍		主盐	25
次磷酸钠		还原剂	25
乙酸钠		缓冲剂	10
胂		络合剂	10
工艺条件	pH 值 温度	4.5 30℃~40℃	

## 二、电铸金属母版

电铸是通过在已形成导电层的芯模上作金属的电沉积，然后将沉积的金属层从芯模上剥离下来，以制取精密元件的拷贝。电铸和电镀的基本原理相同。目前利用电铸工艺已经可以沉积 30 种金属和 180 多种二元合金。但在模压全息图的生产过程中，考虑到压



模必须具有高硬度、抗拉伸、低应力、耐摩擦等物理特性，一般选用电铸镍来制造金属模板。

图 4-39 是一种最常用的电铸装置，它由电镀槽、直流电源、安培小时计、加热及温控系统、循环过滤系统、钛篮(阳极)和挂具(阴极)等部件组成。

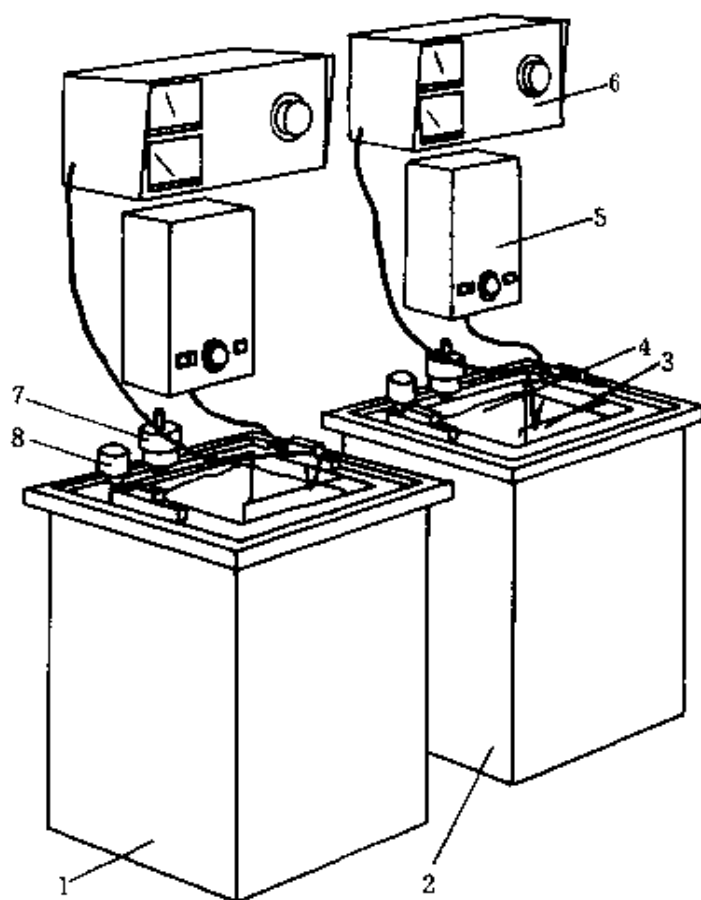


图 4-39 电铸装置

- 1—电铸槽(软槽); 2—电铸槽(硬槽); 3—阴极(工件); 4—阳极(钛篮);  
5—控制器(温度控制及安培小时计数); 6—直流电源; 7—过滤泵;  
8—过滤器。

电铸液的配方,各种添加剂的合理使用以及正确的工艺规范,是决定电铸质量的三个主要因素。下面分别来讨论。

#### (一)电铸液配方

在模压全息中,一般采用以氨基磺酸镍为主盐的酸性电铸液,

它的配方如表 4-7。

表 4-7 氨基磺酸镍电铸液配方及工艺规范

化学成分		分子式	浓度	功能	工艺参数
配 方	氨基磺酸镍	$\text{Ni}(\text{NH}_2\text{SO}_3)_2$	450g/L	主盐 缓冲剂	
	硼酸	$\text{H}_3\text{BO}_2$	30g/L		
工 艺 条 件	pH 值				3~5(4.5)
	温度/℃				40~60(50)
	电流密度/(A/ dm) <sup>2</sup>				2~30(2~15)

### (二) 添加剂

作为润湿剂的表面活性物质是电铸必须的添加剂。在初始沉积阶段,如果电铸表面张力太大,芯模表面难以充分湿润而容易产生针孔、麻点等疵病,加入适量的润湿剂可解决上述问题。常用的润湿剂有十二烷基磺酸钠,烷基硫酸钠等阳离子表面活性剂。实验表明,当润湿剂浓度由 0.01g/L 增大到 0.2g/L 时,电铸液表面张力可从 70mN/m 降至 40mN/m。

糖精等含硫有机添加剂对改进镍层的机械物理性能有明显作用。实验表明,加入适量的糖精,不仅可将镍层的硬度调节到需要的数值,而且可以改善镍层的内应力分布,得到无应力的镀层。

### (三) 工艺参数对镀层质量的影响

影响镀层质量的主要工艺参数有 pH 值、温度和电流密度。

镀液的 pH 值升高时,镍层的硬度、抗拉强度和屈服强度均有所增大,电导率几乎不变,延展率则呈下降的趋势。另外电流效率随 pH 值升高而大幅度增大。

镀液的温度升高时,镍层的硬度先是略有降低,然后稳定在某一定值。在低温(<50℃)时镍层的抗拉强度几乎不变,温度高于 50℃时,抗拉强度有所降低,但延展率增大。

电流密度增大时,镍层的硬度、抗拉强度及屈服强度都降低,但应力和延展性却呈增大的趋势。

### 三、拷贝工作模板

生成第一代金属母板之后,可应用同样的设备和类似的工艺,

拷贝第二代、第三代金属模板。在模压全息图生产过程中,一般采用第三代金属模板作为工作模板。由于电铸工艺具有十分精密的复制特性,所以由一块母板,可以拷贝出 10 块左右高质量的第二代模板,又由第二代模板可以拷贝出 100 块左右高质量的工作模板。拷贝工作模板和电铸金属母板在工艺上的主要差别表现在以下几个方面。

(1) 拷贝工作模板无需对芯模进行敏化、活化处理。

(2) 拷贝工作模板存在着与金属芯模剥离的问题。解决这个问题一般是在镀前对芯模作钝化处理。一种最常用的钝化工艺是制备浓度为 0.05%~0.20% 的重铬酸钾溶液,在温度 25℃, pH=4 的情况下将金属芯模在钝化液中浸渍 30~60s,使其表面生成一层厚度在 0.5~1mm 的氧化层。钝化液的浓度和浸渍时间的长短是工艺的关键,氧化膜太薄,拷贝的剥离很困难,氧化膜太厚,又会引起电铸的镍层起皮。

除此之外,在某些电铸工艺中还采用矿物油、硅酮油、乳化剂、有机溶剂等对芯模钝化处理,产生有机分离层。

(3) 工作模板要求具有较高的硬度和小的应力。因此要在电铸液中添加适量的硬化剂(如糖精等含硫化合物)。通常,母板是在不含硬化剂的软槽中电铸;而工作模板则是在含有硬化剂的硬槽中电铸。

(4) 工作模板对厚度及厚度的均匀性要求均十分苛刻,通常要求其厚度偏差不大于  $\pm 20\mu\text{m}$ ,厚度均匀性的误差不大于  $\pm 1\mu\text{m}$ 。因此电铸中必须进行严格的面形控制。

电铸过程中,金属沉积的速率是和阳极与阴极之间电流密度成正比。在通常情况下,阳极与阴极之间电流密度分布如图 4-40(a)所示,即边缘大中心小,因此电铸出的金属模板总是边缘厚中心薄。解决的办法是在阳极和阴极之间加入适当开孔的栅板,利用边缘的衍射效应,改变电流密度的分布(如图 4-40(b))。在实际工作中,可根据对工作模板面形的要求,设计一整套具有不同开孔的栅板,并控制不同工作阶段的电流强度,就能得到满意的效果。

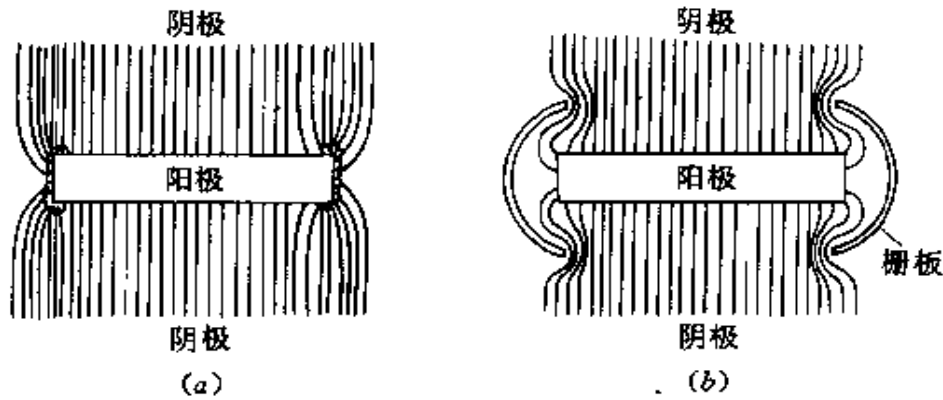


图 4-40 栅板对电力线分布的影响  
(a)未加栅板时电力线分布;(b)加入栅板后电力线分布。

#### 4.3.5 模压技术<sup>[4-10-4-11]</sup>

全息图的模压复制是一种机械复制方法,它的基本原理是用表面带有精细浮雕干涉条纹的金属模板对加热到粘流态的热塑性材料进行加压,使热塑性材料与全息金属模板密合,于是就将金属模板上的浮雕条纹转印到了热塑性材料上。经过短暂时间的保压,使热塑料片与金属模板分离,自然冷却定型之后,热塑性材料上就形成了与金属模板完全相同的全息图。

模压分为平压和滚压两种,其中滚压又分为圆压平和圆压圆两种。

目前在模压全息图和全息光栅装饰材料生产中应用最广泛的是圆压圆装置,即模压机。图 4-41 是目前国内用得最多的一种窄幅模压机。它由模滚、左右压滚、收放卷系统,张力控制系统,气压控制系统,加热温控系统,走偏控制系统,拖动系统及速度控制系统组成。由于采用左右压滚对压的方式,生产速度可达 15m/min,最大压印宽度可达 30cm,一块质量合格的工作镍板,可压印镀铝 PEJ 薄膜 3000m~4000m。

图 4-42 是一种宽幅模压机,它的结构和控制系统与图 4-41 的窄幅模压机类似,但更加先进的设计使得它的最大压印宽度可达 1m,最高加工速度可达 40m/min,这种机型主要用在螺纹光栅

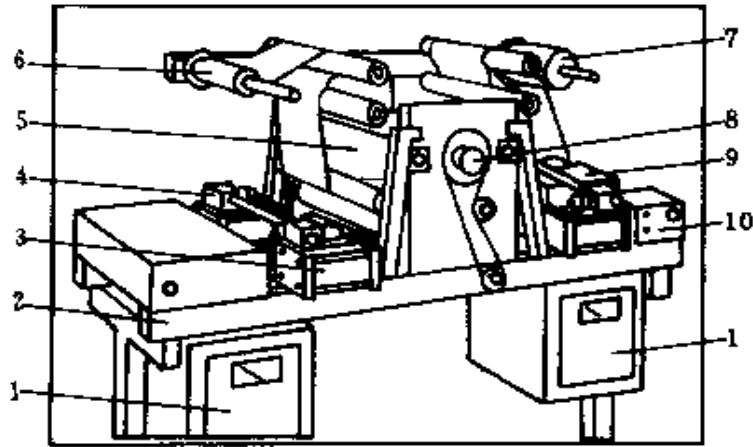


图 4-41 DC-3 型窄幅模压机

1—控制单元；2—底座；3—高压气筒；4—高压气阀；5—左压滚；6—放卷轴；7—收卷轴；8—模滚；9—电动机；10—转速调节装置。

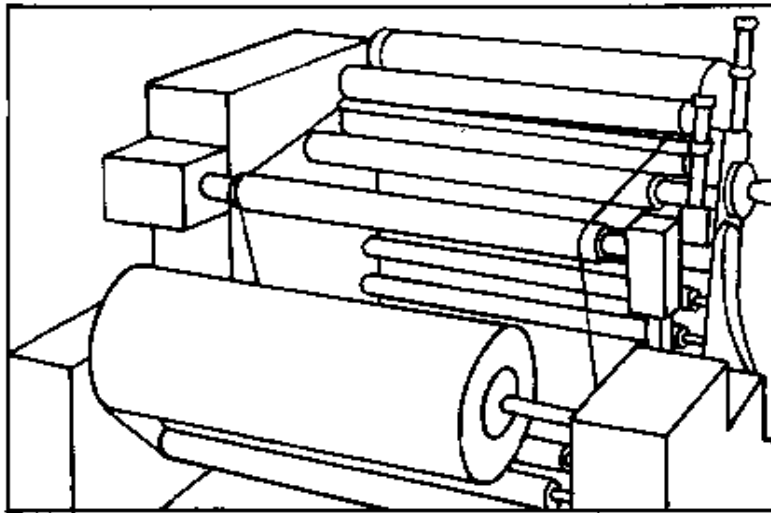


图 4-42 宽幅模压机

装饰材料的生产线上。

目前世界上最先进的模压机是近年美国人研制的紫外模压机 (UV Embosser), 图 4-43 是该机示意图。喷胶机 1 将快速紫外固化的树脂胶均匀地喷涂在塑料基材上, 复合滚 2 将此基材复合到模滚 3 上, 经紫外灯 4 照射, 金属模板上的浮雕条纹就转印到了塑料片基上。这种机器的最大优点是不用加热, 复合压力很小, 因此衍射效率高, 图形不变形, 金属模板寿命长, 生产速度快。

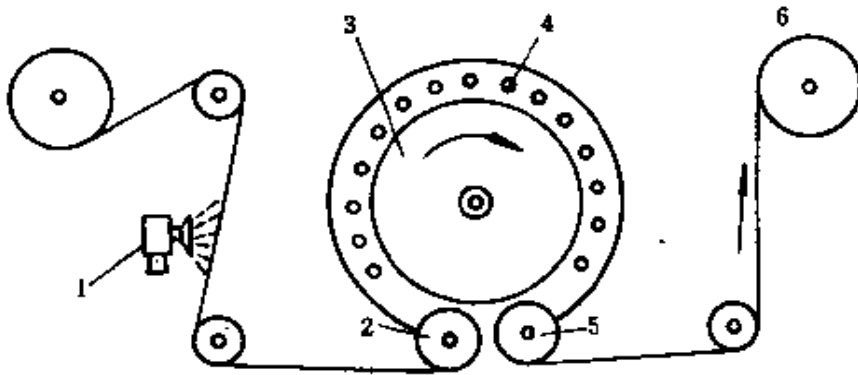


图 4-43 UV 模压机示意图

1—喷胶机；2—复合滚；3—模滚；4—紫外灯；5—剥离滚；6—收卷轴。

## 4.4 计算机全息图和二元光学元件制造技术

### 4.4.1 概述

计算机全息图是利用数字计算机综合的全息图，它的制作过程包括对物体光信息的采集、处理、编码、存储和再现，它是对全息术波前记录和再现过程的计算机仿真。和干涉全息图相比，它的特点是，功能灵活，适用范围比较广。特别是在制作计算机全息图时，不必提供物理存在的实体，只要给出物体波函数数学描述，就可以用计算机综合出任意波面来。

二元光学元件是近十多年来在计算机全息图的基础上发展起来的，它结合了用计算机设计任意形状波面的灵活性以及现代微电子学工艺技术的精密性。二元光学元件是一种表面呈台阶形分布，浮雕深度仅为亚微米的极精密的位相型元件。它具有微型化、集成化、可复制等优点，因而在许多特殊应用领域发挥了普通光学元件所无法替代的作用。

### 4.4.2 计算机全息图的制作和再现过程<sup>[4.12,4.13]</sup>

不论何种类型的计算机全息图，其制作过程均可以分为下述四个步骤：物体信息的采集，物体信息的处理，物体信息的编码和

计算机全息图的形成。下面对各步骤的作用和实施方式作一概括说明。

### 一、物体信息采集

计算机全息图所要记录的物体信息可由物体的复振幅透过系数或复振幅反射系数来表示。对于实际存在的透射或反射物体,可用扫描数字化仪或摄像机进行数据采集,而对于那些只能用数字解析式来表示的实际并不存在的物体,则可直接从计算机键盘输入。

但值得注意的是,计算机全息图是用计算机对物体信息进行运算处理而综合出的,被运算处理和传送的信息必须是离散化的串行的数字信号。这就要应用抽样定理,对空间连续分布的物函数进行抽样,取出最少可能的有限个数据点来代表整个物函数。按照抽样定理,设二维物体的空间宽度为  $S_x, S_y$ , 它的频带宽度为  $F_x \cdot F_y$ , 则为了有效地记录和再现物体波面,最小的抽样单元数应为

$$N^2 = S_x \cdot S_y \cdot F_x \cdot F_y \quad (4-27)$$

如果考虑到每一个抽样点的函数值应由振幅和位相,或复数的虚部和实部表示,则一个二维物函数至少必须要用  $2S_x \cdot S_y \cdot F_x \cdot F_y$  个实数值来表示。但在实际制作计算机全息图时,考虑到计算机存储容量和图形输出设备的限制,一般选取的抽样单元数都远小于物体的空间带宽积,其结果是造成物体信息的部分丢失和再现像质量的下降。

### 二、物体信息的处理

对物体信息处理的任务是,根据所要记录的全息图类型,由数据采集得到的物体平面上的物体波函数信息,求出全息图平面上的物体波函数信息。所以实际上,物体信息处理的任务就是完成一个变换,即将要记录的物体波函数由物平面变换到全息图平面。

对于计算机像平面全息图。全息图平面的物光波与物平面上的分布相同,只需完成简单的相似坐标变换。

对于计算机傅里叶变换全息图,全息图平面的复振幅分布是

物分布的空间频率,所以要对采集的物体信息作二维傅里叶变换。这通常可应用快速傅里叶变换的算法来完成。

对于计算机菲涅耳全息图,全息图平面的复振幅是物分布的菲涅耳衍射,在已知物函数分布及传播距离之后,可利用基尔霍夫衍射积分来表示。这一计算过程也可以利用快速傅里叶变换来完成。

### 三、物体信息的编码

我们知道,被记录的物体信息通常为复数形式,但迄今为止的一切记录介质都只能对实的非负信号产生响应,即不能直接记录复数信号,因此必须对物体的复振幅信息进行编码。所谓编码,实际上就是一种映射,即把空间复振幅函数映射为实的非负值函数,变成能对记录介质产生响应的形式。

对物体信息编码的具体形式很多,但可归纳为两大类。第一类是按照干涉全息图的思路使物光波和参考波干涉,即通过参考波这一种载波形式对物光波进行幅度调制和位相调制,形成稳定的干涉条纹的强度分布。通过对各种光记录介质曝光而记录下来。这种编码方式的本质是,用干涉条纹的位置编码了物体的位相,干涉条纹的反衬度编码了物体的振幅信息。下面要介绍的干涉型计算机全息图即是采用的这种编码方式。第二类编码方法是利用全息图上两个独立的参量来分别编码物体波函数的振幅和位相(或实部和虚部),由于这两个独立参量均为非负的实数,因此可为一般的记录介质所接受。下面要介绍各种迂回位相法就是这种编码方法的实例。

### 四、计算机全息图的形成

前面三个步骤可称为计算机全息图的设计阶段。通过计算机的运算处理,得出了经过编码的离散化表示的全息图函数,第四步即是用计算得出的全息图函数控制适当的计算机外部设备,在适当的记录介质上形成可用于波前重现的全息图。根据所形成的全息图类型的不同,所用的计算机外部设备也不相同。在形成振幅全息图时,采用的图形输出设备有绘图仪、图形发生器、光绘仪、显微



密度计、激光光束扫描记录装置等。在形成浮雕型位相全息图时,采用的图形输出设备除了上述各种类型之外,还需要光刻机、离子束蚀刻机或电子束蚀刻机等等。对此将在以下各节中分别介绍。

#### 4.4.3 用迂回位相法编码的计算机全息图<sup>[4.12]</sup>

迂回位相法是德国科学家罗曼根据不规则光栅衍射理论而提出的一种对复数进行编码的方法。图 4-44 是用迂回位相法制作傅里叶变换型计算机全息图的制作流程图。关于对物函数的采集、抽样、傅里叶变换等步骤在前节已作了介绍,下而着重介绍编码方法和图形输出过程。

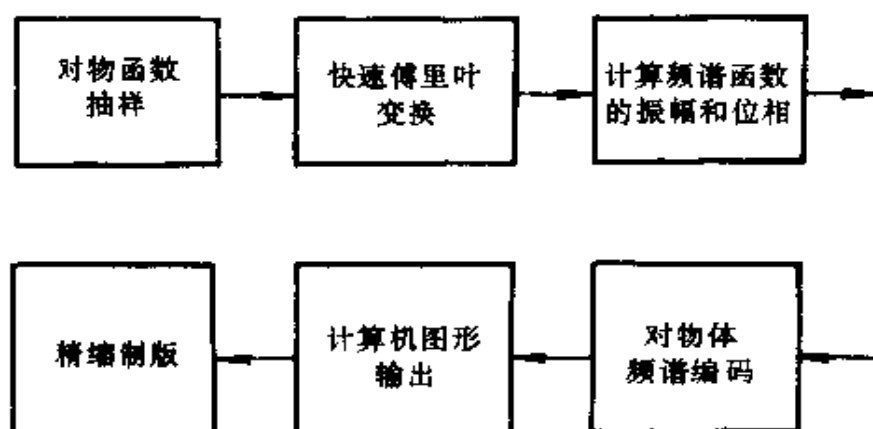


图 4-44 傅里叶变换计算机全息图制作流程图

##### 一、迂回位相编码方法

迂回位相编码法的实质是用两个非负的实数来分别编码复值函数的振幅和位相,达到储存物体全部信息的目的。图 4-45(a)、(b)、(c)分别给出了罗曼 I 型、I 型和 II 型三种迂回位相编码方法的示意图。设第(mn)个抽样点处的全息图函数为  $A_{mn}e^{j\phi_{mn}}$  ( $m, n$  分别表示  $x, y$  方向的抽样序号),按照迂回位相编码方法,以此抽样点为中心取一  $(U \cdot V)$  的矩形抽样单元,复函数的振幅  $A_{mn}$  和位相  $\phi_{mn}$  可用该抽样单元中某种衍射孔径的两个不同的实数参量来编码。

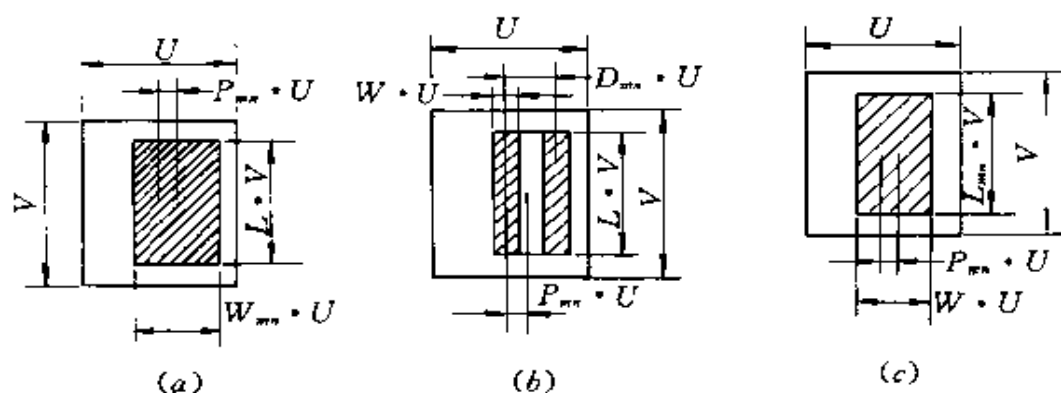


图 4-45 迂回位相编码方法

(a) 罗曼 I 型; (b) 罗曼 II 型; (c) 罗曼 III 型。

在罗曼 I 型中,衍射孔径高度为常数  $L \cdot V$ ,宽度  $W_{mn} \cdot U$  与归一化的振幅  $A_{mn}$  有关,而衍射孔径相对于抽样单元中心的偏离量  $P_{mn} \cdot U$  则与  $2\pi$  为模的位相  $\phi_{mn}$  有关,表示为

$$\begin{cases} L = \text{常数} & (0 < L \leq 1) \\ W_{mn} = \frac{1}{\pi} \arcsin(A_{mn}) \\ P_{mn} = \frac{1}{2\pi} \phi_{mn} \end{cases} \quad (4-28)$$

罗曼 II 型的衍射孔径为两个相同的矩形。两个矩形孔的高度和宽度均是常数;两个矩形的间距  $D_{mn}$  编码复函数的振幅;而两个矩形的中心相对抽样单元中心的偏离量  $P_{mn}$  编码了复函数的位相。表示为

$$\begin{aligned} L &= \text{常数} & (0 < L \leq 1) \\ W &= \text{常数} & (0 < W < \frac{1}{2}) \\ D_{mn} &= \frac{1}{\pi} \arccos(A_{mn}) \\ P_{mn} &= \frac{1}{2\pi} \phi_{mn} \end{aligned} \quad (4-29)$$

罗曼 III 型是应用较多的一种编码方法。它和罗曼 I 型的位相

编码方法相同,而振幅编码的区别是二衍射孔径宽度不变,高度  $L_{mn}V$  和归一化振幅  $A_{mn}$  成正比。表示为

$$\begin{cases} W = \frac{1}{2} \\ L_{mn} = A_{mn} \\ P_{mn} = \frac{1}{2\pi}\phi_{mn} \end{cases} \quad (4-30)$$

除了以上基本方法外,人们还发展多种不同的迂回位相编码方法。如利用将复数分解为两个正交分量的四分单元法以及将复数分解为互成  $\frac{2\pi}{3}$  的分量的三分单元法等。这些方法都说明,对同一个复函数,编码方法不是唯一的,但出发点都相同,即用物理上可实现的两个非负的实数来分别编码复值函数的振幅、位相或复数的实部和虚部。

## 二、图形输出

迂回位相法编码的计算机全息图通常采用计算机控制的绘图仪来绘制。

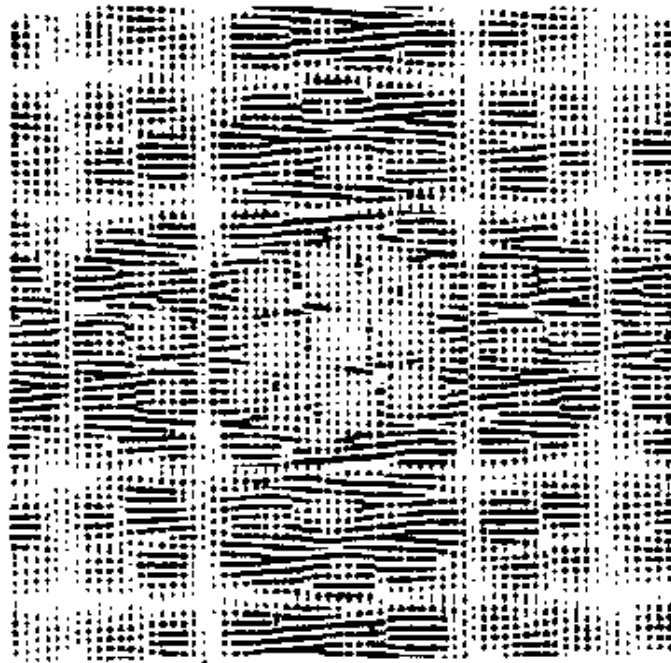


图 4-46 计算全息滤波器

首先,根据计算得出的各抽样点处归一化全息图函数的振幅和位相,利用所采用的迂回位相法的参数计算式(4-28)至式(4-30),可算出各矩形衍射孔径四个角点的坐标,然后由计算机调用作为专用外部设备的绘图仪,画出各抽样单元中的矩形衍射孔径,经过计算机描黑,就得到一张计算机全息原图,再经过适当倍率的精缩,就制成了可用于光学再现的计算机全息图。图 4-46 是用迂回位相法制作的用于消模糊的维纳滤波器,这个计算机全息图是在 CTS-I 型平板绘图仪上绘制的,它包含  $64 \times 64$  个抽样单元,计算和绘图时间为  $75\text{min}^{[4,13]}$ 。

#### 4.4.4 计算机全息干涉图

计算机全息干涉图又称为干涉型计算机全息图,它是对光学全息图的计算机仿真。我们知道,光学全息图是物光波  $O(x,y) \cdot \exp[j\phi(x,y)]$  和参考波  $R \exp(j2\pi x/T)$  叠加的干涉图,其透过率

$$H(x,y) = R^2 + |O(x,y)|^2 + 2RO(x,y)\cos[2\pi x/T - \phi(x,y)] \quad (4-31)$$

其极大值位置满足

$$2\pi x/T - \phi(x,y) = 2N\pi \quad (4-32)$$

其中  $N$  为亮纹序号。在已知物光波复振幅分布的情况下,可用计算机直接算出抽样形式的干涉图的亮纹位置和形状,然后控制各种图形输出设备,在相应的记录介质上形成计算机全息干涉图。

制造计算机全息干涉图的最简单的图形输出设备是计算机控制的绘图仪。借助于电信系统中非线性限幅器的模型,解全息干涉图条纹基本方程式

$$-\pi q(x,y) \leq 2\pi x/T - \phi(x,y) + 2N\pi \leq \pi q(x,y) \quad (4-33)$$

可解出第  $N$  个干涉条纹上强度为 1 的全部点的坐标  $(x,y)$ ,用计算机控制的绘图仪将这些点描黑,就绘出了序号为  $N$  的干涉条纹。改变条纹序号  $N$ ,就可以绘出整张全息干涉图的原图,再经适

当缩版,就制成了计算机全息干涉图。条纹基本方程式中的参数  $q(x,y)$  称为偏置函数,它和物光波的振幅  $O(x,y)$  有关,反映在全息图上,则是条纹的宽度。当物体是纯位相型时,常将  $q$  取作  $\frac{1}{2}$ ,此时各干涉条纹宽度相等。由于计算机全息干涉图的透过率只有(0, 1)两个值,因此又称为二元计算机全息图。计算机全息干涉图允许漂白为位相型全息图,其衍射效率可由 10% 提高到 40% 左右,这是它和迂回位相形计算机全息图的最大区别。

另一个适合制造二元计算机全息图的装置是激光束扫描记录系统,结构如图 4-47 所示。其制作过程是,首先利用计算机解全息

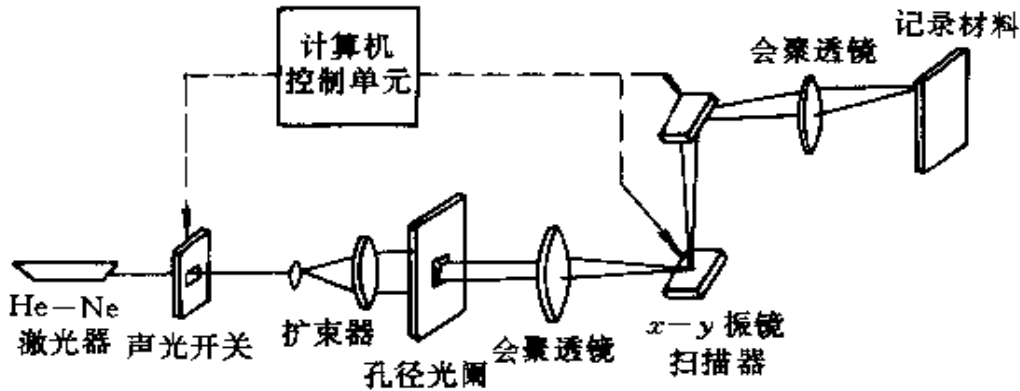


图 4-47 激光束扫描记录系统

干涉图条纹基本方程式(4-33),求出强度为 1 的全部点的坐标  $(x, y)$ ,控制声光开关和  $x-y$  扫描器,用聚焦的激光束对记录材料逐点曝光。

除此之外,记录二元计算全息图还可采用光绘仪、图形发生器或精密阴极射线管。以光绘仪为例,它由光源、可调光阑、电子快门、缩微透镜和精密  $X-Y$  移动工作台组成。光绘机的笔实际就是大小和形状不同的几种孔径光阑。用电子计算机控制电子快门和工作台的移动,直接对底片曝光,记录二元计算机全息图。

#### 4.4.5 二元光学元件

在近代光学中,人们将基于光的衍射原理实现波面变换、成

像、分束合束、模式分析等功能的光学元件称之为衍射光学元件(DOE),如波带板、光栅、全息光学元件(HOES)等,以区别于传统的折射光学元件。近年来迅速发展的二元光学元件是衍射光学的一个新的分支。

二元光学元件是以光的衍射理论和计算机技术作为设计基础,以现代微电子技术作为加工制造和测量手段发展起来的。设计人员应用衍射理论和计算机数值计算,设计出满足一定功能的二元光学元件的位相分布,然后通过制造掩模,光刻,离子蚀剂,镀膜等各种微细加工方法,在玻璃、硅片或晶体片基上形成由亚微米级离散像素构成的浮雕型结构。图4-48给出了三种不同类型的二元光学元件剖面示意图,其中图(a)为二值型,只包含 $0, \pi$ 两个位相等级;图(b)为多值型,包含有 $N=2^n$ 个位相等级(图中 $n=2$ );图

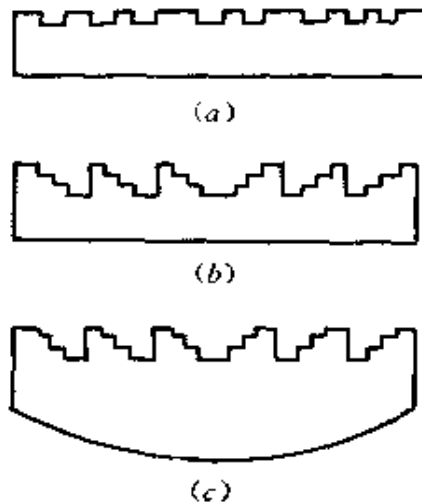


图 4-48 二元光学元件的结构

(a)二值型元件;(b)多值型元件;(c)混合型元件。

(c)为混合型,它由一个折射光学元件和一个二元光学元件组合而成。二值型元件的主要优点是加工制造较为容易,但是它衍射效率不高,难于实现复杂的波面变换。多值型元件可以达到接近100%的衍射效率,并可在准单色光下使用,对偏振方向也不敏感。混合型元件除具有以上优点外,由于折射元件与衍射元件的色散作用在一定程度上的互相补偿,整个元件对波长的变化更不敏感,因此可以在宽带光下面使用。

二元光学元件具有许多突出的优点,这是传统的折射光学元件以及一般的全息光学元件所不可比拟的。首先,它可以灵活地产生任意复杂形状的波面,或者将一种波面或辐射强度分布变换为另一种符合要求的波面或强度分布;它可将多种功能集于一身,具有集成化、微型化、轻型化的特点;它的衍射效率高,当位相等级  $N \geq 16$  时,同轴理论衍射效率接近于 100%;它适用范围广,不仅可用于激光等单色光,也可用于准单色光乃至宽带光源;不仅可用于可见光,而且可用于微波、红外、紫外和射线等各种不同的波段。二元光学元件这些优良特性必将促进光学设计从折射向衍射发展。光学元件和系统从宏观和分立向微型和集成方向的发展,势必引发一场光学领域的新的技术革命。

#### 一、二元光学元件的设计

二元光学元件的设计方法可分为解析法和迭代法。但不论采用何种方法,其基本原理都是应用菲涅耳—基尔霍夫衍射理论求解衍射或逆衍射问题。

图 4-49 是解析法的典型问题,即由给定的  $P_2$  平面的像分布  $g(x, y)$  求解  $P_1$  平面上二元光学元件的复振幅分布  $f(\xi, \eta)$ 。根据

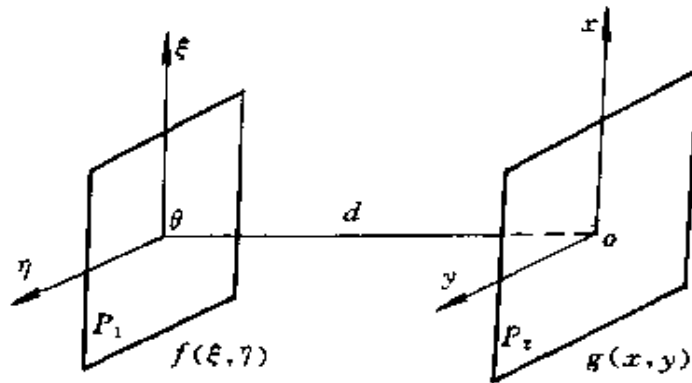


图 4-49 逆衍射问题模型

菲涅耳衍射积分公式,  $g(x, y)$  和  $f(\xi, \eta)$  之间满足

$$g(x, y) = ce^{iKd} e^{iK\left(\frac{x^2+y^2}{2d}\right)} \iint_{\Sigma} f(\xi, \eta) e^{-i\frac{K}{2}(x\xi+y\eta)} d\xi d\eta \quad (4-34)$$

$$\begin{aligned} \text{令} \quad G(x, y) &= g(x, y) e^{-iKd} e^{-i\frac{K}{2d}(x^2+y^2)} \\ F(\xi, \eta) &= f(\xi, \eta) e^{i\frac{K}{2d}(\xi^2+\eta^2)} \end{aligned} \quad (4-35)$$

则有:

$$G(x, y) = c \iint_{\Sigma} F(\xi, \eta) e^{-i\frac{K}{2}(x\xi+y\eta)} d\xi d\eta \quad (4-36)$$

上式表明,像分布  $G(x, y)$  和衍射元件的透射函数  $F(\xi, \eta)$  之间满足二维的傅里叶变换关系。通过求逆衍射问题,即可由已知的像分布  $G(x, y)$  求出二元光学元件的复振幅分布函数  $F(\xi, \eta)$ 。即

$$F(\xi, \eta) = c' \iint G(x, y) e^{i\frac{K}{2}(x\xi+y\eta)} dx dy \quad (4-37)$$

这就是用解析法求解二元光学元件的基本关系式。值得注意的是:上述方程的求解是十分繁琐的,只有对于像简单的圆对称或点阵分布的像函数,才能求出解析结果。

迭代法是光学自动设计中采用的优化算法。它的基本原理是:根据物空间和像空间的复振幅分布,首先给出一组二元光学元件的初始位相值,通过反复迭代和调整,逐次逼近,最后得出一组满足像分布要求的二元光学元件位相分布的最优解。图 4-50 是 GS 算法的迭代原理图。

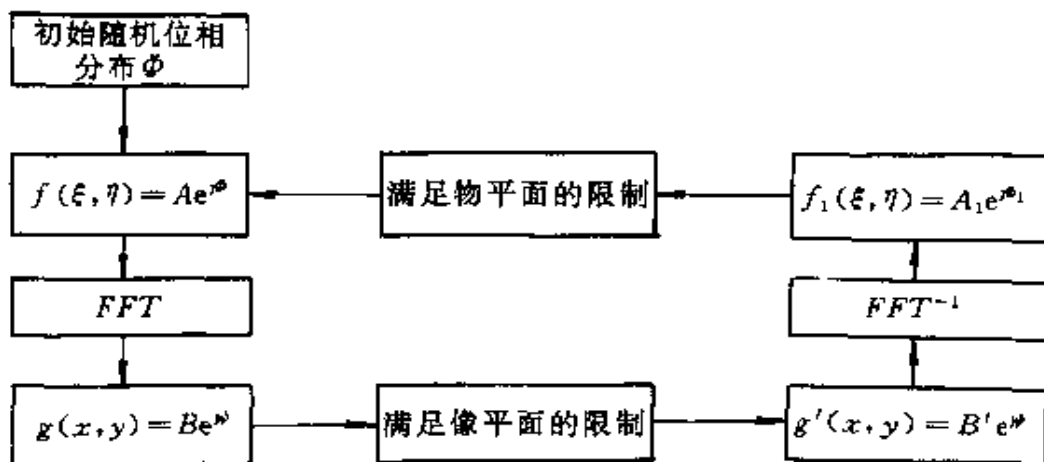


图 4-50 GS 算法迭代原理图

迭代算法的方法很多,但按其原理可分为误差下降法和模拟退火法两类。前者的特点是收敛速度快,但很容易陷入局部极值,



不易得出全局最优解。模拟退火法将统计原理引入优化算法中,虽然增大了计算工作量,但可以有效地跳出局部极值区,得出全局最优解。

## 二、二元光学元件的制造工艺<sup>[4,14]</sup>

二元光学元件是一种纯位相型衍射光学元件,它的表面台阶的深度及空间周期均小于光波长,因此必须应用现代微电子技术中的微细加工工艺来制造。目前常用的加工工艺有如下几种。

### (一)离子蚀刻法

这种方法的工艺流程是,根据设计出的二元光学元件的位相分布,产生一组振幅型掩模,然后通过反应离子蚀刻,制造出二元光学元件。

#### 1. 二元振幅型掩模的制造

首先将解出的二元光学元件位相值量化为  $N$  个等级,一般取  $N=2^n$ 。为制造出具有  $N$  个位相量化等级的二元光学元件母板,必须产生  $n$  个二元振幅型掩模。以  $N=4$  为例,则 1 号掩模板的透明单元对应于位相值为  $\pi$  和  $\frac{3\pi}{2}$  的像素,用于刻蚀两个深度单位;2 号掩模板的透明单元对应位相值为  $\frac{\pi}{2}$  和  $\frac{3\pi}{2}$  的像素,用于刻蚀两个深

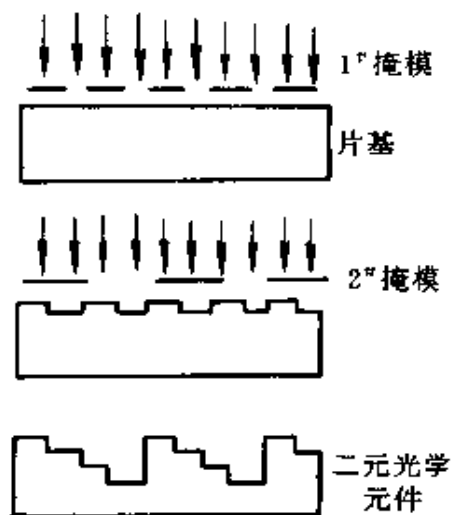


图 4-51  $n=2, N=4$  的套刻过程

度单位。通过两次重复套刻,可产生具有四个位相等级的台阶形结构。图 4-51 表示用两个掩模板产生四个位相等级的套刻过程。

二元振幅型掩模的制造分两步完成。首先在涂布了光致抗蚀剂的掩模片基上记录二元分布的位相图案,即对位相值不等于零的像素单元曝光。经显影处理之后,这些感光单元的抗蚀剂被溶解而暴露出片基上的铬层。第二步采用化学蚀刻法,腐蚀掉暴露的铬层,使这些像素单元成为透明。整个工艺过程如图 4-52 所示。

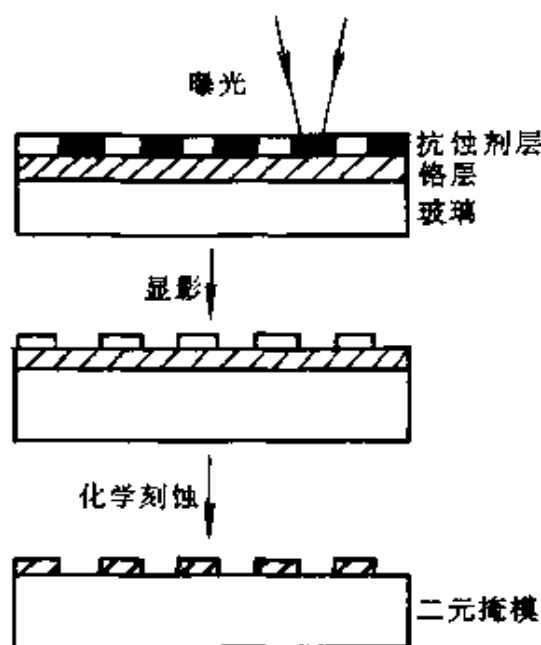


图 4-52 振幅型掩模制造工艺

对振幅型掩模板的曝光记录目前多数采用计算机控制的图形发生器或光绘仪,对于空间频率较低的元件,例如应用于微波波段的二元光学元件,也可采用精度稍低的分步重复照相机。

## 2. 母版的刻蚀加工

在早期的微电子加工工艺中,一直沿用湿刻蚀方法(即化学刻蚀),采用的刻蚀液主要有高氟酸,碳酸,高锰酸钾,铈硝酸铵等。湿刻蚀工艺成本较低,但它的主要缺点是容易产生钻蚀现象,影响元件的线形,另一个缺点是很难实现套刻,因而不能制造具有多位相等级的元件。还有就是对环境的污染。因此近年来,湿刻蚀工艺已逐渐被等离子体干刻蚀所取代。等离子体干刻蚀除了克服了湿刻蚀

的上述缺点之外,还大大提高了图形的分辨率。离子束刻蚀机由主机和控制系统构成,主机包括工作室和真空系统;控制系统包括电源和离子源控制单元,真空测量及气压自动控制单元,束流密度测量单元,工作台旋转控制单元及冷却控制单元等,其中离子源是整机的核心。图 4-53 是反应离子束刻蚀机的主机示意图。它的基本工作原理是,离子源发射出的离子束通过加速,轰击被刻蚀的样品表面,通过样品表面掩模图形的限制和离子与材料之间的相互作

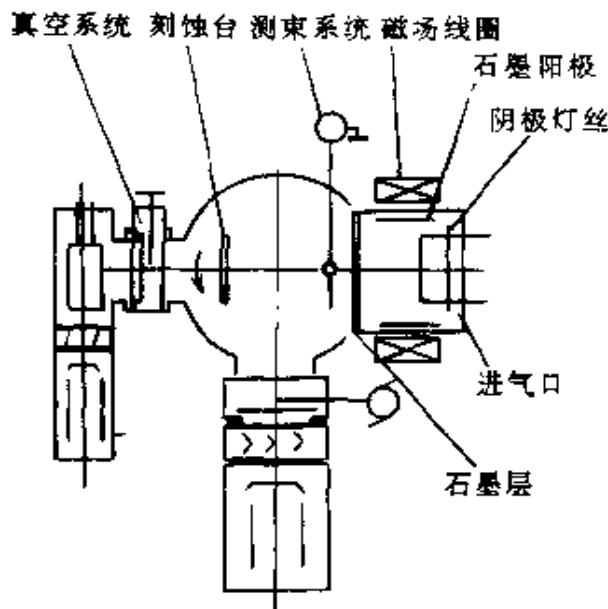


图 4-53 反应离子束刻蚀装置

用,造成被轰击表面的原子大量溅射,以逐渐剥离的方式将掩模图形复制到片基表面上。

### (二)薄膜沉积法

用薄膜沉积法制造二元光学元件的步骤如图 4-54 所示。首先在片基上涂布一层光致抗蚀剂,用接触复印法把二元振幅掩模上的图案复制到抗蚀层上,如图 4-54(a)所示。然后在真空中均匀蒸镀一层  $\text{SiO}_2$ ,控制膜层的厚度,使其精确实现所要求的相移(见图 4-54(b))。第三步用碱溶液清除抗蚀层,留下具有要求厚度的  $\text{SiO}_2$  图形,如图 4-54(c)、(d)所示。用多个掩模重复上述步骤,就可以制造具有多位相等级的二元光学元件。

### (三)电子束直写方法

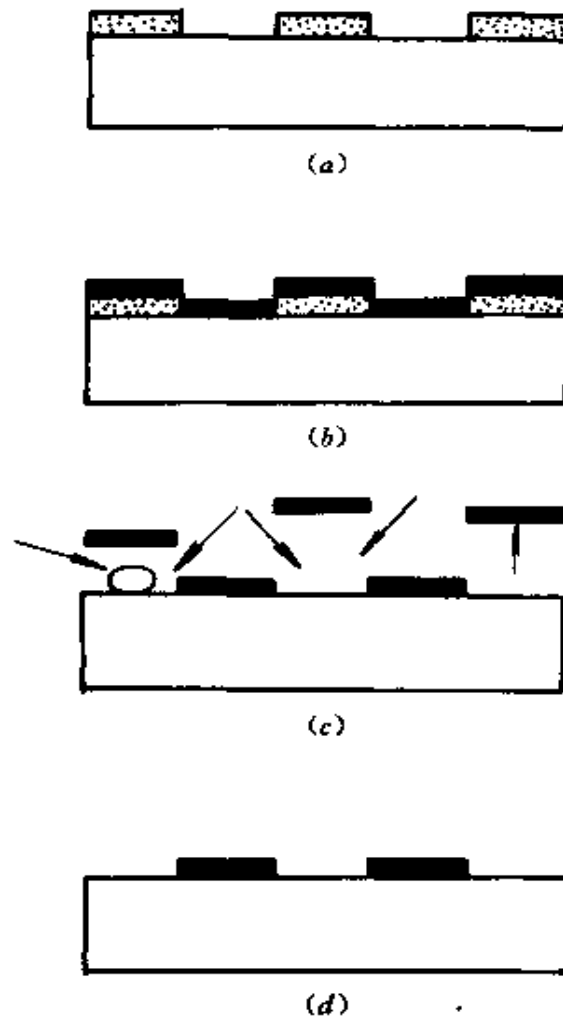


图 4-54 薄膜沉积法工艺流程

(a)在光致抗蚀剂层上形成图形;(b)薄膜沉积;  
(c)去除光致抗蚀剂;(d)形成位相结构。

为了制造更加精密的微型化的二元光学元件,必须采用电子束直写方法。电子束直写要使用电子束印刷系统(e-beam lithography),记录过程不需要掩模,可以直接在晶片上以1:1的比例记录亚微米级的图案。电子束印刷系统的原理框图如图4-55所示。它由一台扫描电子显微镜,一台微处理机和一些外部设备控制器组成。直接在晶片的透明导电层( $\text{In}_2\text{O}_3$ )上涂布电抗蚀剂,通过电子束的扫描和工件台的移动,直接在晶片上记录需要的位相分布图案。电子束直写记录系统精度很高,以美国贝尔实验室设计的EC-BES-40A系统为例,它的最高分辨率可达 $0.25\mu\text{m}$ ,线条边缘

粗糙度小于 $\pm 0.05\mu\text{m}$ , 在 $15\times 15\text{cm}^2$  范围内累计位置误差小于 $\pm 0.1\mu\text{m}$ 。这种方法的主要缺点是, 由于不用掩模, 所以必须通过重复扫描才能产生多位相等级的图案, 记录时间相对较长。

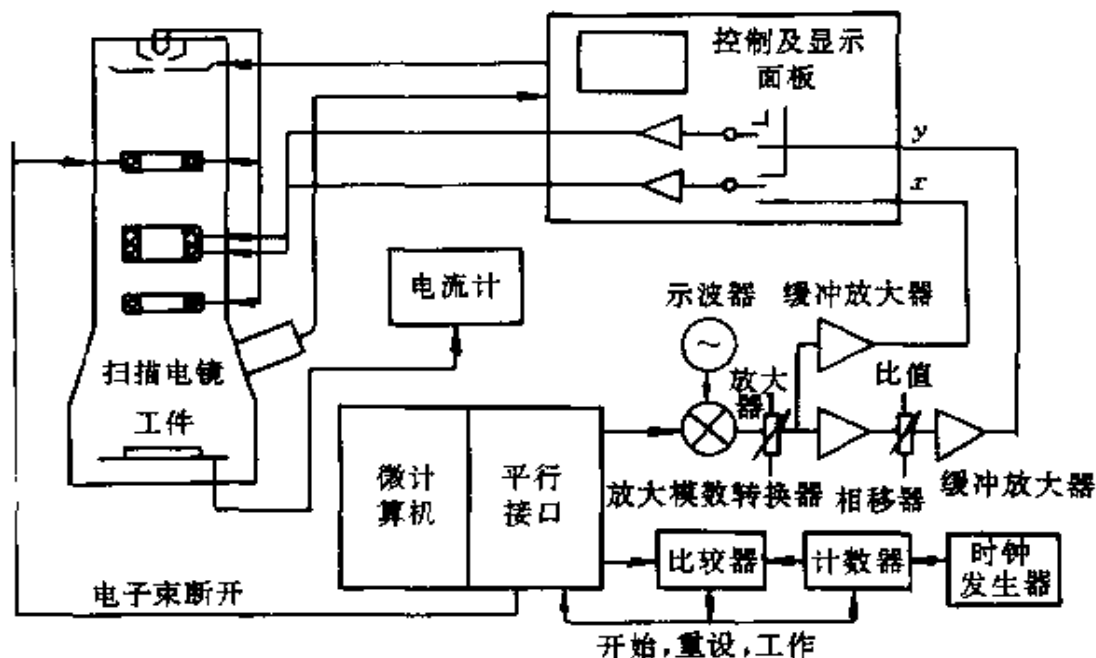


图 4-55 电子束印刷系统原理框图

#### (四)复制技术

复制技术是二元光学元件制造的关键环节, 已经发展的复制技术包括环氧树脂铸造, 溶胶铸造 (Solglue Casting), 模压 (Emboss) 和全息复制方法等。下面以模压方法来说明在 PMMA 上复制二元光学元件的过程。

如图 4-56 所示, 在光学平面上放上 1mm 厚的 PMMA 材料, 上面覆盖要复制的二元光学元件母版。一起放入真空度为 133.322Pa 的真空炉中, 施加适当压力, 并在 1h 内将温度由室温逐渐升高至 140℃, 恒温 1h 之后炉子断电, 压力逐渐加大, 温度逐渐降至室温。最后将母版剥离, 就得到复制品。用这种方法复制的透镜阵列衍射效率可达 91%, 且光学质量一致。它的缺点是保真度稍差, 特别微细的结构不容易复制, 且 PMMA 塑料容易出现热变形。

另一种具有发展前途的复制方法是光学塑料的注射成型, 用这种方法复制的光学元件其特征尺寸可以小到  $1\mu\text{m}$ , 且环境稳定

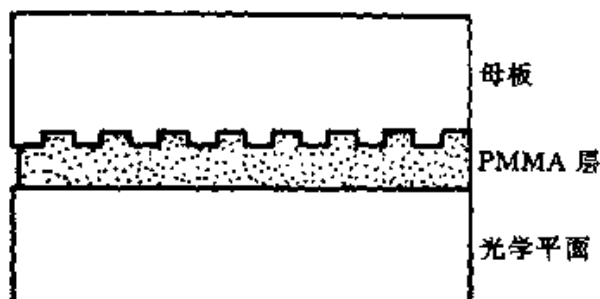


图 4-56 模压复制原理

性比模压零件更好。

### 参 考 文 献

- 4.1 于美文等. 光学全息及信息处理. 北京:国防工业出版社,1988
- 4.2 谢敬辉等. 消除全息图背景光栅的技术. 北京理工大学学报, vol. 8, No. 9, 1988, 44~48
- 4.3 谢敬辉等. 横向面积分割法及其在 2D/3D 全息图中的应用. 光学学报, vol. 8, No. 5, 1988, 410~414
- 4.4 Bartolini R, et al. Embossed Hologram motion picture for television playback. Applied Optics, vol. 9, No. 10, 1970, 2283~2284
- 4.5 谢敬辉, 赵业玲, 于美文. 三维全息图和全息光栅的模压复制技术. 光学技术, 1986(5): 2~5
- 4.6 谢敬辉, 赵业玲. 全息图模压复制技术(I)—浮雕型彩虹全息图的形成. 光学技术, 1990(3): 5~10
- 4.7 Hutley M C. Diffraction Grating. Academic Press Inc (London) Ltd, 1982
- 4.8 谢敬辉, 赵业玲. 全息图模压复制技术(I)—全息金属模板制造工艺. 光学技术, 1990(4): 28~31
- 4.9 曾华梁等. 电镀工艺手册. 北京:机械工业出版社, 1989
- 4.10 谢敬辉, 赵业玲. 全息图模压复制技术(II)—模压复制及热冲压转印技术. 光学技术, 1990(5): 14~17
- 4.11 (日)武内敏. ホログラフイ技術の利用とその用途. 画像技術情報, 1986(4)
- 4.12 虞祖良, 金国藩. 计算机制全息图. 北京:清华大学出版社, 1984
- 4.13 谢敬辉, 金国藩. 文字图像编码转换所用计算全息滤波器. 光学学报, vol. 3, No. 3, 1983, 242~246
- 4.14 辛企明. 二元光学元件. 光学技术, 1993(4), 38~41

## 第五章 梯度折射率光学元件

### 5.1 概 述

#### 5.1.1 发展简史

梯度折射率(Gradient Index,缩写 GRIN)光学,又称渐变折射率光学,是一门新的光学分支学科。它主要研究非均匀光学材料及其在光学成像系统中的应用。有时(例如在梯度折射率光学专题国际学术讨论会上)又把它扩展到非均匀介质光波导及其应用。本章所讨论的 GRIN 光学仍仅限于成像系统(包括光准直和耦合)方面。梯度折射率光学的得名是因为这些材料的折射率是按空间坐标函数的形式变化的。早在 1854 年麦克斯韦就首次提出了具有球形折射率分布的鱼眼透镜,随后伍德和鲁尼伯格都提出了具有径向折射率梯度的透镜,后人分别称之为伍德透镜和鲁尼伯格透镜。但由于尚未找到产生折射率梯度的技术,这种设想一直未能得到发展。直到本世纪 60 年代,出现了玻璃的离子交换技术,这为制作梯度折射率元件带来了希望。到 80 年代,对梯度折射率制造技术、检测方法及 GRIN 材料的研究已变得十分活跃。到目前为止,GRIN 光学在光线追迹、像差理论和透镜设计方面已趋成熟。在制造技术方面也出现了离子交换、溶胶-凝胶、有机材料聚合等多种技术,其中离子交换技术更为成熟,并已有产品在市场上出售。对 GRIN 材料的研究,特别是用于离子交换的 GRIN 玻璃的研究也较深入。由于 GRIN 透镜具有体积小、几何形状简单(表面为平面)、制造技术相对容易等优点,它们在光纤通信器件、望远镜、小型照相机、显微物镜、内窥镜等成像光学系统,光纤传感器、成像传

感器、机器人等传感技术,以及光盘读头、复印机、传真机、光计算等领域中有广泛的应用。

### 5.1.2 梯度折射率(GRIN)的表述

采用多项式来描述 GRIN 是一种普遍而方便的方式

$$N(r, z) = \sum_{p=0}^m r^{2p} \left[ \sum_{q=0}^n N_{pq} z^q \right] =$$

$$N_{00} + N_{01}z + N_{02}z^2 + \dots + r^2(N_{10} + N_{11}z +$$

$$N_{12}z^2 + \dots) + r^4(N_{20} + N_{21}z + N_{22}z^2 + \dots) + \dots$$
(5-1)

其中,  $z$  值沿光轴方向,  $r$  为垂直于光轴的径向坐标值,  $r^2 = x^2 + y^2$ ,  $N_{pq}$  为折射率分布系数, 它随波长而变。为了定量描述由于折射率梯度而产生的色散, 对每个折射率分布系数, 定义其梯度折射率阿贝数为

$$\nu_{ij} = \frac{N_{i,jd}}{N_{i,jF} - N_{i,jC}} \quad i \neq 0 \quad j \neq 0 \quad (5-2)$$

其中  $d$  表示氦谱线  $\lambda_d = 587.6\text{nm}$ ,  $C$  和  $F$  表示氢的两条谱线  $\lambda_C = 656.3\text{nm}$  和  $\lambda_F = 486.1\text{nm}$ 。对  $i=j=0$ , 式(5-2)便成为均匀介质的传统阿贝数

$$\nu_{00} = \frac{N_{00d} - 1}{N_{00F} - N_{00C}} = \frac{n_d - 1}{n_F - n_C} \quad (5-3)$$

习惯上往往把  $N_{00d}$  和  $\nu_{00d}$  表示为  $n_d$  和  $\nu_d$ 。在许多情况下采用  $d$ 、 $F$ 、 $C$  谱线下的最大折射率差  $\Delta n$  来定义阿贝数更为方便

$$\nu_{\text{GRIN}} = \frac{\Delta n_d}{\Delta n_F - \Delta n_C} \quad (5-4)$$

### 5.1.3 梯度折射率的类型和应用

#### 一、轴向梯度

对轴向梯度透镜来说, 沿光轴  $z$  方向的折射率为梯度分布, 而垂直于光轴的平面内具有恒定的折射率, 如图 5-1 所示。公式



(5-1)中  $N_{pq}$  的角标  $p=0$ , 即所有含  $r$  项都为零。因此, 轴向梯度透镜折射率分布的表达式简化为

$$N(z) = N_{00} + N_{01}z + N_{02}z^2 + \dots \quad (5-5)$$

当沿坐标方向折射率增大时, 或玻璃表面折射率小而内部折射率大时, 称为正折射率梯度。反之则称为负折射率梯度。

轴向梯度透镜的特性除色差外, 基本与球面透镜相似。它的色差随折射率分布与波长的关系  $\nu_{\text{GRIN}}$  以及基体玻璃的色散  $\nu_d$  而变化。习惯上用玻璃表面处的有效阿贝数  $\nu_{\text{eff}}$  来考查它的影响

$$\nu_{\text{eff}} = \frac{n'_d - 1}{n'_F - n'_C} \quad (5-6)$$

其中  $n'_d = n_d + \Delta n_d$ ,  $n'_F = n_F + \Delta n_F$ ,  $n'_C = n_C + \Delta n_C$ 。式(5-6)亦可改写成

$$\nu_{\text{eff}} = \frac{(n_d + \Delta n_d - 1)\nu_{\text{GRIN}}\nu_d}{(n_d - 1)\nu_{\text{GRIN}} + \Delta n_d\nu_d} \quad (5-7)$$

在对轴向梯度透镜的色差进行近轴计算时必须使用有效阿贝数。

若将轴向梯度透镜的两个表面磨成曲面(如图 5-1 所示), 适当选择折射率分布和曲面的曲率, 且使梯度深度大于曲面的高度, 则可校正单透镜的球差<sup>[5.1]</sup>。在许多光学系统中, 轴向梯度透镜可在保证成像质量的同时, 减少系统光学元件的数量。目前已用轴向梯度的方法制成了衍射受限单片准直透镜<sup>[5.1]</sup>。轴向梯度望远物镜也已在美国陆军 M-19 望远镜中使用, 零件数从三片减少为两片<sup>[5.2, 5.3]</sup>。

## 二、径向梯度

径向梯度透镜的折射率沿垂直于光轴方向变化, 且具有圆对称分布, 而沿轴向则无折射率的变化, 如图 5-2 所示。式(5-1)中  $N_{pq}$  的角标  $q=0$ , 即所有含  $z$  项都为 0, 因此, 径向梯度透镜折射率

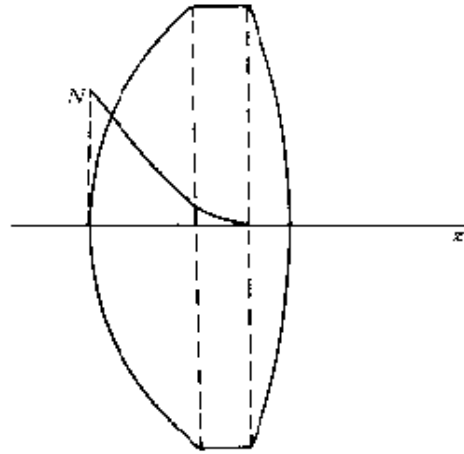


图 5-1 轴向梯度透镜

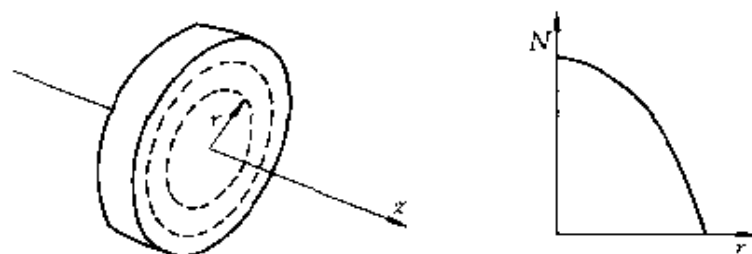


图 5-2 径向梯度透镜

分布表达式简化为

$$N(r) = N_{00} + N_{10}r^2 + N_{20}r^4 + \dots \quad (5-8)$$

最常见的情况是略去  $r^4$  以上的高次项,只保留  $r^2$  以下项,这时的折射率呈抛物线分布。习惯上将式(5-8)改写成

$$n(r) = n_0 \left( 1 + \frac{1}{2} A r^2 \right) \quad (5-9)$$

式中  $A$  为折射率分布系数,  $n_0 = N_{00}$  为轴上点折射率。已经证明,当折射率分布为  $\text{sech}(ar)$  时,入射子午光线可以会聚到一点,实现完善的自聚焦<sup>[5,4]</sup>。对抛物线分布,子午光线轨迹为正弦曲线,近轴子午光线也近似有自聚焦特性。因此又把这种透镜称为自聚焦透镜。在径向 GRIN 透镜中,光线轨迹刚好为正弦曲线一个周期的距离,称为它的周期长度

$$P = 2\pi / \sqrt{A} \quad (5-10)$$

径向 GRIN 透镜两端是平面时仍具有成像特性,其焦距为

$$f_1 = f_2 = \frac{1}{n_0 \sqrt{A} \sin(\sqrt{A}t)} \quad (5-11)$$

式中  $t$  为透镜厚度。其主平面位置  $h$  和截距  $S$  分别为

$$h_1 = h_2 = \frac{1}{n_0 \sqrt{A}} \text{tg}(\sqrt{A}t/2) \quad (5-12)$$

$$S_1 = S_2 = \frac{1}{n_0 \sqrt{A} \text{tg}(\sqrt{A}t)} \quad (5-13)$$

由式(5-10)和式(5-13)可见,  $t = P/4$  时  $S_1 = S_2 = 0$ , 即焦点刚好在

两端面上。对子午光线定义了透镜在空气中的数值孔径

$$NA = \sin\theta_{\max} = \sqrt{n_0^2 - n_1^2} \approx \sqrt{2n_0\Delta n} \quad (5-14)$$

它反映了透镜所能接收入射子午光线的最大半孔径角  $\theta_{\max}$ ，它与透镜中心折射率及最大折射率差有关。

径向 GRIN 透镜的色散特性同样取决于折射率分布与波长关系，以及基体玻璃折射率与波长的关系。由于径向梯度对近轴像的特性及像差都有影响，因此对色散特性的影响也更加明显。径向梯度透镜的近轴色散 (PAC) 公式与均匀介质单透镜的 PAC 具有完全相同的形式

$$PAC \propto -\phi/\nu_{10} = 2N_{10}t/\nu_{10} \quad (5-15)$$

式中  $\phi$  为透镜放大率。将径向梯度透镜的表面磨成曲面可以校正轴上色差<sup>[5.5]</sup>，也可利用梯度像差校正均匀介质(曲面)产生的像差。

长棒 GRIN 透镜可将像成在棒透镜内部，因此往往在像中继系统中使用它，例如各种内窥镜<sup>[5.6]</sup>。在小型复印机和传真机中利用其非常短的共轭距离，通过透镜阵列可实现一比一成像<sup>[5.7]</sup>。在光纤通信器件中已经广泛使用径向 GRIN 透镜。由于  $P/4$  的透镜的焦点恰好在其两端面上，因而为耦合技术带来了方便。光纤耦合器、波分复用器、光开关、半导体激光器或发光二极管的准直，以及光盘物镜等都已采用这种透镜。另外，在许多光学透镜系统中也采用部分径向梯度透镜，但由于可利用的 GRIN 材料种类有限，在应用方面还不如均匀介质普通透镜那样广泛和普遍。

### 三、球面梯度

如果折射率分布满足如下形式

$$n = f(r) \quad (5-16)$$

$$r^2 = x^2 + y^2 + z^2$$

即折射率分布具有对原点的球面对称形式，则它属于球面梯度。

最早的 GRIN 透镜是麦克斯韦鱼眼透镜和鲁尼伯格球透镜，但它们或无实用价值，或根本无法实现。1986 年首次采用悬浮聚

合法制成有机聚合物 GRIN 球透镜<sup>[5,8]</sup>。这种透镜的实际折射率分布很难用解析式来描述,而往往只能用数值方法来表达。为计算其球差,采用下式描述<sup>[5,9]</sup>

$$n(r) = n_0 - \Delta n(r/r_0)^\alpha \quad (5-17)$$

式中  $n_0$  为球心点折射率,  $\Delta n = n_0 - n_P$ , 为球心与表面折射率差。当  $\alpha=1$  和 2 时分别代表线性分布和抛物线分布。

径向 GRIN 透镜中离轴的空间光线(非子午光线)是产生像差的主要因素,而球面 GRIN 透镜因其对球心呈球对称形式而无光轴存在,因此希望它能完全消除这种由空间光线产生的像差。

## 5.2 离子交换原理

目前已有多种方法制作梯度折射率材料,玻璃中的离子交换法是研究得最多也较为成熟的方法,它的适用性强,对各种类型基体玻璃成分、尺寸及几何形状都可产生折射率梯度。离子交换工艺比其它工艺简单,它是目前唯一有商品上市的生产工艺,这里首先作一介绍。

### 5.2.1 离子交换与玻璃结构

玻璃呈一种扩展的无对称性、无周期性的分子网络结构,能形成玻璃的阳离子(如 Si, B, P 等)排列成四面体或三角形成为网络主体。这些阳离子分为桥键离子和非桥键离子,前者指两个多面体通过一个氧离子键合在一起,后者指氧离子仅属于其中一个多面体,多余的一个负电荷由低电荷的大尺寸的阳离子(如 Na, K, Ca, Ba 等)来平衡,形成交联的长链聚合物结构。

玻璃中各成分按它们的氧化物单键强度划分为三大类:网络生成体、中间体和网络外体。对光学玻璃,大多数情况下选择  $\text{SiO}_2$  作网络生成体,这是因为在玻璃相图上它有较大的玻璃生成区,具有优良的光学、力学和热学性能,成本低。有时为了一些特殊目的也选择其它氧化物作玻璃生成体。例如,硼酸盐铜玻璃是色散低、

折射率高的冕玻璃；硼酸盐铝玻璃具有异常玻璃色散；许多磷酸盐玻璃都具有非常低的色散。

中间体不能单独形成玻璃网络，但它显著地影响玻璃结构，因而明显影响玻璃性能，如折射率、色散、化学、力学和热学性能。 $\text{ZnO}$ 、 $\text{BaO}$ 、 $\text{Ta}_2\text{O}_5$ 、 $\text{La}_2\text{O}_3$  和  $\text{ZrO}_2$  能用来生成高折射率的冕玻璃，而  $\text{TiO}_2$ 、 $\text{Bi}_2\text{O}_3$ 、 $\text{PbO}$  和  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  常用来生成高折射率的火石玻璃， $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{CaO}$  和  $\text{MgO}$  常用在冕玻璃中作中间体，这些中间体在玻璃中含量都很少（一般小于 10%），它们对基体玻璃的折射率影响不大，但可以改进玻璃的化学、力学和热学性能。

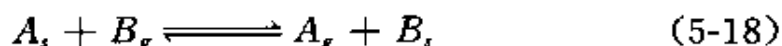
在所有玻璃成分中，网络外体的单键强度最弱，对玻璃结构没有明显的影响，但可改良玻璃的性能。网络外体包括一价氧化物  $\text{Na}_2\text{O}$ 、 $\text{K}_2\text{O}$ 、 $\text{Li}_2\text{O}$ 、 $\text{Ag}_2\text{O}$ 、 $\text{Cs}_2\text{O}$  和  $\text{Tl}_2\text{O}$ ，以及某些二价氧化物  $\text{CaO}$ 、 $\text{BaO}$ 、 $\text{PbO}$ 、 $\text{MgO}$  等。这些二价离子在玻璃软化点以下时互扩散系数非常低，迁移率也就很低。因此它们不参予离子交换反应。而那些一价离子由于单键强度很小，在温度升到一定高度时这些离子获得了足够的动能，从而可以摆脱离子间的束缚，从网络外的一个平衡位置跳到另一个平衡位置，形成了离子迁移。当这些离子脱离了玻璃界面就会形成离子交换。当玻璃中这种离子的浓度不均匀时，就会出现从浓度高处向浓度低处的扩散运动。在外电场作用下，电场力的作用会加快离子的定向迁移，从而提高扩散速度和加大扩散深度。

### 5.2.2 离子交换反应

离子交换是将玻璃基体置于高温熔盐中，使熔盐中的一价离子取代玻璃中不相同的一价离子的过程。实际上是同时进行着两个过程：一个是在玻璃—熔盐界面上两种离子相互取代——离子交换过程；另一过程是进入玻璃表面的一价离子向玻璃中扩散、迁移，而玻璃中被交换的一价离子向界面扩散迁移的过程。

在玻璃—熔盐界面，由于存在离子浓度梯度，使玻璃表面获得足够动能的离子摆脱束缚进入熔盐，同时熔盐中另一种一价离子

进入玻璃取代原来一价离子的位置。这一反应可用下式表示



式中,  $A$  和  $B$  分别代表两种一价离子, 如  $K^+$ 、 $Na^+$ 、 $Li^+$ 、 $Cs^+$ 、 $Ag^+$  或  $Tl^+$ ; 下角标  $s$  和  $g$  分别表示“在熔盐中”和“在玻璃中”。该反应的趋势由平衡常数  $K$  来决定,  $K$  是生成物和反应物的活性比

$$K = \frac{a_g b_s}{a_s b_g} \quad (5-19)$$

式中  $a$ 、 $b$  分别表示玻璃( $g$ )和熔盐( $s$ )中的  $A$ 、 $B$  离子的活性。平衡常数  $K$  定量描述了发生离子交换的趋势, 亦就是定量描述了玻璃对不同离子的选择性。  $K$  越大表示离子交换更为完全。熔盐的活性由下式给出

$$\begin{aligned} a_i &= \gamma_i c_i \\ b_i &= \gamma_B c_B \end{aligned} \quad (5-20)$$

式中,  $\gamma_i$  为活性系数,  $c_i$  为熔盐中  $i$  离子的摩尔百分比。对于二元系规则熔盐, 其活性系数由下式确定

$$RT \ln \gamma_i = A' (1 - c_i)^2 \quad (5-21)$$

式中,  $R$  为普适气体恒量;  $T$  为开氏绝对温度;  $A'$  是熔盐中成分的净相互作用能量, 它可在许多有关混合熔盐的书中查到<sup>[5,10]</sup>。对许多玻璃系, 离子活性比可由罗斯曼—康菲尔德(Rothmund-Kornfeld)关系给出

$$a_B/b_g = [c_A/c_B]^n \quad (5-22)$$

其中,  $n$  是罗斯曼—康菲尔德因子。对玻璃而言  $n=1$  是理想情况, 说明其活性直接与浓度成比例。由式(5-19)~式(5-22)可得

$$\begin{aligned} \ln [c_A(s)/c_B(s)] - \frac{A'}{RT} [1 - 2c_B(s)] = \\ n \ln [c_A(g)/c_B(g)] - \ln K \end{aligned} \quad (5-23)$$

方程左边是已知参数, 右边可视为一条斜率为  $n$ 、截距为  $\ln K$  的直线。由此可从已知量(含测量量)确定  $n$  和  $K$ 。可见  $n$  只和玻璃有关, 而  $K$  却不仅与玻璃还和熔盐有关。表 5-1 列出了几种类型玻璃在  $Ag/Na$  二元系熔盐中的  $K$  和  $n$  值。从表中看出, 在  $AgCl +$

表 5-1 几种玻璃在两种二元系熔盐中的  $K$  与  $n$  值<sup>[5.11]</sup>

玻璃类型	熔盐	温度/℃	$K$	$n$
Al-B-Si	Ag/NaNO <sub>3</sub>	300	2.55	1.4
Na-Si	Ag/NaNO <sub>3</sub>	350	120/150	2.3
Na-B-Si	Ag/NaNO <sub>3</sub>	350	4	1.6
康宁 Vycor	Ag/NaCl	560~585	$1.2 \times 10^{-4}$	—
GE204(熔融石英)	Ag/NaCl	546	$1.7 \times 10^{-4}$	1.0
Al-Si	Ag/NaCl	502	$2.4 \times 10^{-3}$	1.8

NaCl 熔盐中  $K$  值很小, 仅达  $10^{-3} \sim 10^{-4}$  量级, 这说明玻璃更偏向于选择 Na 离子。采用纯 AgCl 熔盐交换时, 玻璃中外扩散出来的  $\text{Na}^+$  在玻璃表面聚集, 浓度增大, 使离子交换不能完全进行, 这种现象称为  $\text{Na}^+$  的“毒化”作用。由表 5-1 还可看出在 Ag/NaNO<sub>3</sub> 系统中  $K$  值大 4~5 个量级, 说明在 AgNO<sub>3</sub> 熔盐中  $\text{Ag}^+ - \text{Na}^+$  的交换更易进行, 这与实验结果相符。比较 AgNO<sub>3</sub> 和 AgCl 两种熔盐中的离子交换反应, 前者产生的折射率差大得多, 这说明对给定的阳离子的平衡常数与阴离子关系极大。斯特恩(Stern)通过测定薄膜电势研究了几种含氧(酸根)阴离子对平衡常数的影响<sup>[5.12]</sup>, 指出影响平衡常数的主要因素是含氧阴离子, 其影响的强弱程度按以下次序递增:  $\text{CrO}_4 < \text{PO}_4 < \text{NO}_3 < \text{SO}_4$ 。研究表明含氧阴离子对平衡常数的影响是很大的, 如当硫酸盐浓度从零增加至 60mol%, 可使石英的  $K$  值增加两个数量级。

为了提高平衡常数以促进离子交换的进行, 有时往往采用混合熔盐。在  $\text{Ag}^+ - \text{Na}^+$  交换中最常用的有两类混合盐, 一类是在 AgCl 中添加  $\text{ZnCl}_2$  或  $\text{PbCl}_2$ 。后两者可通过络合作用捕获那些起“毒化”作用的自由钠离子, 降低  $\text{Na}^+$  浓度, 从而提高平衡常数  $K$  值。另一类混合盐是在 AgCl 中添加  $\text{Ag}_2\text{SO}_4$  或  $\text{Ag}_2\text{CrO}_4$ , 由阴离子  $\text{SO}_4^{2-}$  或  $\text{CrO}_4^{2-}$  来提高平衡常数。研究表明, 当硫酸盐或铬酸盐在混合盐中占 16% 时, 平衡常数约为  $7.5 \times 10^{-2}$ , 比纯 AgCl 情况 ( $K = 2.4 \times 10^{-3}$ ) 提高一个量级<sup>[5.13]</sup>, 这极大地提高了  $\text{Ag}^+ - \text{Na}^+$

的交换程度,基本达到一对一交换的理想情况,使  $\Delta n$  达 0.149,接近理论计算值(0.15),同时使  $\Delta n$  与 Ag 浓度基本呈线性关系(见 5.4.3 节)。

### 5.2.3 扩散方程及其解

实验中离子交换温度总是低于玻璃的转变温度,因而在整个扩散过程中玻璃结构可以认为是稳定的。对大多数玻璃—熔盐体系来说,熔盐中的离子迁移率远大于玻璃中的离子迁移率,且玻璃—熔盐边界上的反应比玻璃中扩散速度快得多。在这种条件下,可用扩散理论来描述上述扩散过程。

由菲克(Fick)扩散定律和物质连续方程可得扩散方程

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \nabla [D(c) \nabla c] \quad (5-24)$$

式中,互扩散系数  $D(c)$  与各种离子的自扩散系数的关系为

$$D(c) = \frac{D_A D_B}{M_A D_A + M_B D_B} \cdot n \quad (5-25)$$

式中, $D_i (i=A, B)$  为  $i$  离子的自扩散系数, $n$  为罗斯曼-康菲尔德因子, $M_i$  是  $i$  离子摩尔百分比

$$M_i = c_i / (c_A + c_B) \quad (5-26)$$

自扩散系数与温度  $T$  的关系满足阿仁尼斯(Arrhenins)方程

$$D_i = D_0 \exp(-Q/kT) \quad (5-27)$$

式中, $Q$  为活化能(J/mol), $k$  为玻耳兹曼常数, $D_0$  为常数。若  $D_A = D_B$ ,即玻璃中两种离子迁移率相同,那么互扩散系数为常数。

给定边界条件和初始条件,可以得到扩散方程(5-24)的解,若又知扩散时间、扩散温度,则可得最终的浓度分布。以下分两种情况讨论:

#### 一、轴向梯度

取块状玻璃,其厚度远大于扩散深度(至少大 4 倍),此情况可视为半无穷大平板玻璃,方程(5-24)变为一维扩散方程

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ D(c) \frac{\partial c}{\partial x} \right] \quad (5-28)$$



边界条件:

$$c(0, t) = c_0 \quad t > 0 \text{ 时} \quad (5-29a)$$

初始条件:

$$c(x, 0) = c_1 \quad x > 0 \text{ 时} \quad (5-29b)$$

且有

$$c_0 > c_1 > 0 \quad (5-29c)$$

$c_1$  是玻璃中扩散离子的初始浓度,  $c_0$  是扩散离子在玻璃表面被熔盐中离子取代后的浓度。若互扩散系数为常数 ( $D_A = D_B$ ), 对给定的温度, 方程(5-28)的解为余误差函数

$$\frac{c(x) - c_1}{c_0 - c_1} = \operatorname{erfc}\left[\frac{x}{\sqrt{4Dt}}\right] \quad (5-30a)$$

其中  $t$  为扩散时间, 余误差函数为

$$\begin{aligned} \operatorname{erfc}(y) &= 1 - \operatorname{erf}(y) = \\ &= 1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^y \exp(-\eta^2) d\eta \end{aligned} \quad (5-30b)$$

假定折射率与离子浓度成线性关系, 折射率分布可写成

$$n(x) = n_0 + \Delta n \operatorname{erfc}\left[\frac{x}{\sqrt{4Dt}}\right] \quad (5-31)$$

当扩散系数不为常数 ( $D_A \neq D_B$ ) 时, 解的形式不再是余误差函数, 图 5-3 给出了  $D_A/D_B$  取不同值时方程(5-28)的解(浓度分布曲线)。

对厚度为  $2L$  的无穷大平行板, 当  $L$  与扩散深度接近时, 由于两面同时扩散, 初始条件和边界条件变为:

$$c(x, 0) = c \quad -L \leq x \leq L \quad (5-29d)$$

$$c(\pm L, t) = c_0 \quad t > 0 \quad (5-29e)$$

仍有

$$c_0 > c_1 > 0 \quad (5-29f)$$

若互扩散系数为常数, 方程解可写成级数形式

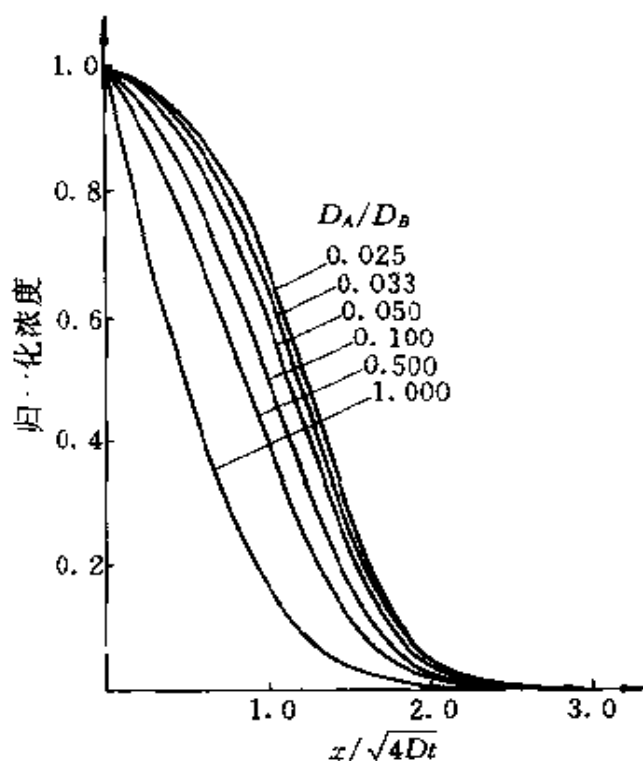


图 5-3 不同  $D_B/D_A$  值时一维扩散方程的解<sup>[5.14]</sup>

$$\frac{c(x) - c_1}{c_0 - c_1} = 1 - \frac{4}{\pi} \sum_{m=0}^{\infty} \frac{(-1)^m}{2m+1} \exp\left[-(2m+1)^2 \pi^2 \frac{Dt}{4L^2}\right] \cos \frac{(2m+1)\pi x}{2L} \quad (5-32)$$

若仅取  $m=0$  项,且把余弦函数作泰勒展开并略去  $x^4$  以上高次项,可得

$$\frac{c(x) - c_1}{c_0 - c_1} = 1 - \frac{4}{\pi} \exp\left[-\frac{\pi^2 Dt}{4L^2}\right] \left[1 - \frac{1}{2} \left(\frac{\pi}{2L}\right)^2 x^2\right] \quad (5-33)$$

假定浓度与折射率成线性关系:  $c(x) \propto n(x)$ ,  $c_1 \propto n_0$ ,  $c_0 \propto n_1$ , 式 (5-33) 写成折射率形式

$$n(x) = n_0 \left(B - \frac{1}{2} Ax^2\right) \quad (5-34)$$

其中:

$$B = \frac{n_1}{n_0} + \frac{4(n_0 - n_1)}{n_0 \pi} \exp\left(-\frac{\pi^2 Dt}{4L^2}\right) \quad (5-34a)$$

$$A = \frac{4(n_0 - n_1)}{n_0\pi} \left( \frac{\pi}{2L} \right)^2 \exp\left( -\frac{\pi^2 Dt}{4L^2} \right) \quad (5-34b)$$

若令  $B=1$ , 则式(5-34)变为抛物线形式

$$n(x) = n_0 \left( 1 - \frac{1}{2} Ax^2 \right) \quad (5-35)$$

由式(5-34a), 此时应有

$$Dt/L^2 = \frac{4}{\pi^2} \ln\left( \frac{4}{\pi} \right) \approx 0.0979 \quad (5-36)$$

说明当选择合适的扩散系数(对给定的玻璃和交换离子, 即选择合适的扩散温度)、扩散时间和玻璃厚度, 使它们满足式(5-36), 则可使离子交换刚好进行到玻璃的中心处, 且折射率最接近抛物线分布。

## 二、径向梯度

如果用半径为  $a$  的无限长玻璃棒进行离子交换, 采用圆柱坐标系改写方程(5-24), 则有

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \frac{1}{r} \left[ \frac{\partial}{\partial r} \left( rD \frac{\partial c}{\partial r} \right) \right] \quad (5-37)$$

边界条件和初始条件分别为

$$c(a, t) = c_0 \quad t > 0 \text{ 时} \quad (5-37a)$$

$$c(r, 0) = c_1 \quad r \leq a \text{ 时} \quad (5-37b)$$

假定互扩散系数为常数时其解为

$$\frac{c(r) - c_1}{c_0 - c_1} = 1 - 2 \sum_{m=1}^{\infty} \frac{J_0(\alpha_m r/a)}{\alpha_m J_1(\alpha_m)} \exp\left[ -\frac{Dt}{a^2} - \alpha_m^2 t \right] \quad (5-38)$$

式中  $J_0$  和  $J_1$  分别为零阶和一阶贝塞尔函数,  $\alpha_m$  是零阶贝塞尔函数的第  $m$  个根。为使用方便, 只取  $m=1$  项, 把  $J_0(\alpha_1 r/a)$  展开成级数形式并取前几项, 同时假定浓度与折射率成线性关系:  $n(r) \propto c(r)$ ,  $c_0 \propto n_1$ ,  $c_1 \propto n_0$ , 则式(5-38)可写成

$$\begin{aligned} n(r) &= n_0 \left[ B - \frac{1}{2} Ar^2 + \frac{1}{8} A \left( \frac{\alpha_1}{2a} \right)^2 r^4 - \frac{1}{72} A \left( \frac{\alpha_1}{2a} \right)^4 r^6 + \dots \right] \\ &\approx n_0 \left( B - \frac{1}{2} Ar^2 \right) \end{aligned} \quad (5-39)$$

式中

$$B = n_1/n_0 + (1 - n_1/n_0) \frac{2\exp\left(-\frac{Dt}{a^2}\alpha_1^2\right)}{\alpha_1 J_1(\alpha_1)} \quad (5-40a)$$

$$A = (1 - n_1/n_0) \frac{4\exp\left(-\frac{Dt}{a^2}\alpha_1^2\right)}{\alpha_1 J_1(\alpha_1)} \left(\frac{\alpha_1}{2a}\right)^2 \quad (5-40b)$$

若略去  $r^4$  以上的高阶项,且令  $B=1$ ,则式(5-39)变为

$$n(r) = n_c \left(1 - \frac{1}{2}Ar^2\right) \quad (5-41)$$

折射率呈抛物线分布,  $A$  即为折射率分布系数。由式(5-40a),若使  $B=1$ ,必有

$$\frac{2\exp\left(-\frac{Dt}{a^2}\alpha_1^2\right)}{\alpha_1 J_1(\alpha_1)} = 1 \quad (5-42)$$

由数学手册可查到  $\alpha_1 = 2.405$ ,  $J_1(\alpha_1) = 0.5191$ ,代入式(5-42)可得

$$T = Dt/a^2 = 0.081 \quad (5-43)$$

图 5-4 给出了 5 种不同  $T$  值所对应的折射率分布曲线。这说明若选择合适的扩散参数,使它们满足式(5-43),则离子交换可以刚好进行到棒中心轴上,且得到最接近抛物线型的折射率分布曲线。

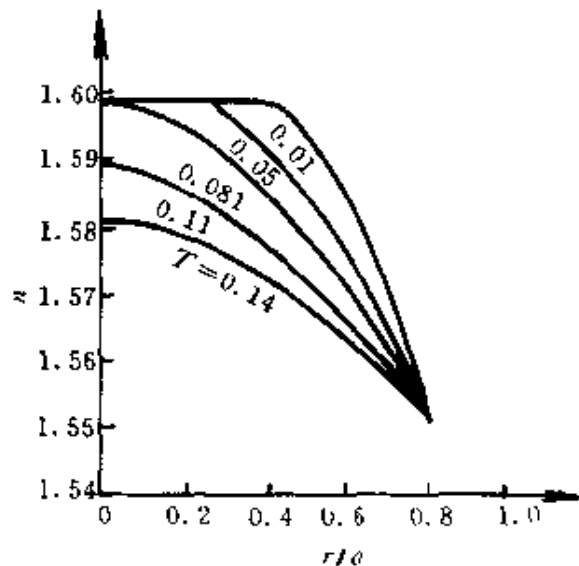


图 5-4  $T$  取不同值时的折射率分布曲线<sup>[5,15]</sup>

## 5.3 GRIN 玻璃及其折射率计算

### 5.3.1 GRIN 玻璃

目前 GRIN 玻璃的品种还远不如普通光学玻璃那样丰富,为了拓宽 GRIN 玻璃的品种,范同(Fantone)在现有的普通光学玻璃上进行了上百次离子交换实验<sup>[5.16]</sup>,但仅发现有两组玻璃—熔盐能产生较大的折射率差(0.01),大多数玻璃交换后或失透或破裂。库特兹(Coutaz)利用肖特火石玻璃 TiF<sub>6</sub> 作离子交换实验<sup>[5.17]</sup>,尽管得到了很大的折射率差(0.22),但扩散深度仅为 50 $\mu\text{m}$ 。北京理工大学强西林采用 K<sub>2</sub> 玻璃作 Ag<sup>+</sup>—Na<sup>+</sup> 交换,扩散深度仅 70 $\mu\text{m}$ 。这些都说明了现有的普通光学玻璃不能用来制作 GRIN 元件,必须开发适于 GRIN 的、用于离子交换的特种玻璃。

日本板玻璃公司生产了一种含 Ti<sub>2</sub>O 的硼硅酸盐玻璃,用 K<sup>+</sup>—Ti<sup>+</sup> 交换来制作 GRIN 棒透镜<sup>[5.7]</sup>,最大折射率差可高达 0.13,棒直径可达 3mm,然而其色散很大( $\nu_{\text{GRIN}} \approx 10$ ),且 Ti 是剧毒物,使用不便。美国博士伦(Bausch and Lomb)公司与美国罗彻斯特大学合作生产了一种含 Na<sub>2</sub>O 的铝硅酸盐玻璃(BL—1206),用于 Ag<sup>+</sup>—Na<sup>+</sup> 交换<sup>[5.14]</sup>。以后罗彻斯特大学又研制了钛硅酸盐玻璃、钽硅酸盐玻璃、镧硅酸盐玻璃和含银的铝磷酸盐玻璃<sup>[5.18]</sup>。北京理工大学与罗彻斯特大学合作开发了两种含 Na<sub>2</sub>O/Li<sub>2</sub>O 的铝硼酸盐玻璃<sup>[5.19]</sup>。这些 GRIN 玻璃的基本性能,包括已经实现的最大折射率差、最大交换深度等列于表 5-2 中,同时在图 5-5 中给出它们在玻璃图中的位置。

从 GRIN 元件的设计和使用角度看,希望 GRIN 玻璃材料具有较大的折射率差同时又有较小的色散( $\nu_{\text{GRIN}}$ 大),希望  $\Delta n$  和  $\nu_{\text{GRIN}}$  能得到很好的控制,从小到大,从正梯度到负梯度有较宽的变化范围;还希望 GRIN 的基体玻璃的折射率和阿贝数也有很宽的分布,从低折射率低色散的冕玻璃到高折射率的冕玻璃及火石玻璃。从现有的 GRIN 玻璃看,这些要求还远远没有满足,尽管在玻璃

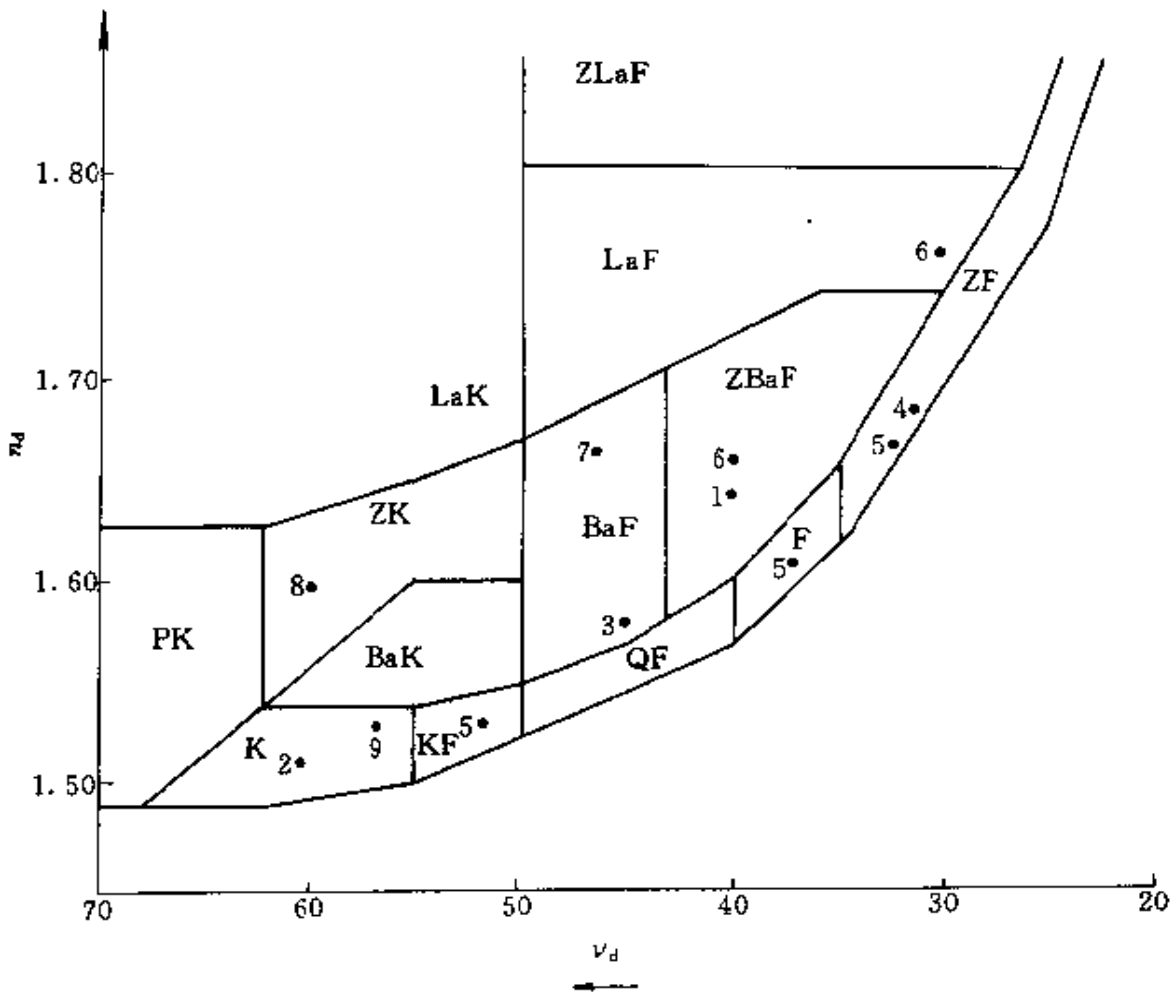


图 5-5 现有 GRIN 玻璃在玻璃图中的分布

- 1—B-Si ( $K^+-Ti^+$ ); 2—Al-Si ( $Li^+-Na^+$ ); 3—Ti-Si  $TiO_2=10\%$  ( $Li^+-Na^+$ );  
 4—Ti-Si  $TiO_2=20\%$  ( $Li^+-Na^+$ ); 5—Ti-Si  $Na_2O=25\%$  ( $Li^+-Na^+$ );  
 6—Ta-Si ( $Ag^+-Na^+$ ); 7—La-Si ( $Ag^+-Na^+$ );  
 8—Ag-Al-P ( $Ag^+-Na^+$ ); 9—Al-B ( $Li^+-Na^+$ ).

图上已有较宽的分布,但品种太少。而且折射率差大的 GRIN 玻璃其色散往往也大,色散小的折射率差也小。现有这些 GRIN 玻璃虽然已涉足到硅酸盐、硼酸盐和磷酸盐三大主系玻璃,但较多较成熟的还属硅酸盐和硼硅酸盐玻璃。硼酸盐玻璃中离子扩散系数小<sup>[5, 19]</sup>,迁移率低,因而影响交换速度。但硼酸盐中可溶解很高浓度的  $Ag_2O$ ,且 La-B 玻璃的色散很低,因而有可能制成大折射率差(负梯度)、低色散的 GRIN 玻璃。

表 5-2 现有主要 GRIN 玻璃性能

玻璃种类	$n_d$	$\nu_d$	离子 交换对	$\Delta n_{max}$	轴向 交换深度 /mm	径向 直径 /mm	$\mu_{GRIN}$
B-Si	1.49~1.66	~40	K <sup>+</sup> -Tl <sup>+</sup>	0.11		3.0	10
Al-Si	1.50~1.53	60	Ag <sup>+</sup> -Na <sup>+</sup>	0.15	6.0	10.0	15
			Na <sup>+</sup> -Ag <sup>+</sup>	0.035			
			Li <sup>+</sup> -Na <sup>+</sup>	0.02	4.0	8.0	100
			Na <sup>+</sup> -Li <sup>+</sup>	0.006		8.0	100
Ti-Si	1.53~1.68	32~54	Li <sup>+</sup> -Na <sup>+</sup>	0.05	4.0	5.0	20
			Na <sup>+</sup> -Li <sup>+</sup>	0.018	3.5	8.0	20
Ta-Si	1.75	31	Ag <sup>+</sup> -Na <sup>+</sup>	0.053	2.5		17.5
La-Si	1.65	46	Ag <sup>+</sup> -Na <sup>+</sup>	0.15	2.5		
Ag-Al-P	1.60	59	Na <sup>+</sup> -Ag <sup>+</sup>	0.08	2.0	4.0	35
Al-B	1.51~1.53	55~60	Li <sup>+</sup> -Na <sup>+</sup>	0.029	1.0		100
			Na <sup>+</sup> -Li <sup>+</sup>	0.014	1.4		
			Ag <sup>+</sup> -Na <sup>+</sup>	0.014	2.5		

### 5.3.2 折射率与浓度关系

美国罗彻斯特大学通过实验对哈金斯—孙—戴维斯(Huggins-Sun-Davis, 缩写 HSD)算法<sup>[5.20]</sup>中某些 GRIN 玻璃的相关常数进行修正,用它们计算 GRIN 玻璃折射率,收到较好效果。

硅酸盐玻璃中各种成分氧化物的分子式用  $R_mO_n$  来表示,其折射率可写为

$$n(\lambda) = 1 + \frac{\sum_i a_i(\lambda)N_i}{V} \quad (5-44a)$$

式中  $a_i$  是第  $i$  种成分的常数权重因子,实际上代表了第  $i$  种成分的折射率常数; $N_i$  是每摩尔氧中第  $i$  种成分的摩尔数

$$N_i = \frac{m_i f_i / W_i}{\sum_i n_i f_i / W_i} \quad (5-44b)$$

式中  $f_i$  是重量百分比,  $W_i$  是第  $i$  种成分的分子量,  $m_i$  和  $n_i$  来自氧化物分子式  $R_m O_n$ ;  $V$  是每摩尔氧的玻璃体积, 也可看作玻璃的摩尔体积, 可表示为

$$V = k + \sum_i b_i + \sum_i c_i N_i \quad (5-44c)$$

其中  $k$  是退火常数, 它表示了不同玻璃在不同退火速率下引起的体积上的差异, 大多数情况下它的值很小, 可取  $k \approx 0$ ,  $b_i$  和  $c_i$  是第  $i$  种成分的体积常数。折射率常数  $a_i$  随波长而变, 它与波长的关系为

$$a_i(\lambda) = d_i [1/(g_i - 1/\lambda^2) - 4.8 \times 10^{-5}] \quad (5-45)$$

其中  $d$  和  $g$  对同一种氧化物是常数。若已知各成分的上述各种常数, 则可预言玻璃的折射率、色散及密度。

范同(Fantone)<sup>[5.16]</sup>和瑞恩—郝沃德(Ryan-Howard)<sup>[5.21]</sup>通过实验对这些常数作了校正和补充, 修正后的常数与现代光学玻璃有较好的一致性。表 5-3 列出了修正后的硅的体积常数, 表 5-4 和表 5-5 分别列出了修正后的其它元素的玻璃常数。由于玻璃中与硼相邻的氧有两种不同数目, 即存在两种配位状态, 所以有

$$N_B = N_{B'} + N_{B''} \quad (5-46)$$

表 5-3 修正后的硅的体积常数<sup>[5.21]</sup>

区间号	$N_{Si-B}$	$b_{Si}$	$c_{Si}$
1	0.250~0.345	5.69	13.00
2	0.345~0.391	4.21	17.27
3	0.391~0.430	2.66	21.14
3A	0.430~0.438	1.91	22.91
4	0.438~0.460	0	26.54
5	0.460 以上	0	27.26



表 5-4 修正后的玻璃成分的常数(表 I)<sup>[5.21]</sup>

离子	N 区间	c	b	a <sub>d</sub>	d	g
Al	0~0.062	15.00	0	10.39	1200.00	118.15
	0.062~	11.38	0.213			
Ti	0~0.06	14	0	28.584	925.30	35.25
	0.06~	1.51	0.749			
La	0~0.02	27.90	0	25.392	1015.58	41.50
	0.02~	6.33	0.444			
Cd		10.065	0	26.09	9900.69	
Hg		904.30	0	15.73	374.82	25.00
KHF		75.579	0	6.021	2223.86	370.00

表 5-5 修正后的玻璃成分的常数(表 I)<sup>[5.21]</sup>

离子	氧化物分子量	c	g	d
Li	29.88	3.9	91.00	406.1
Na	61.98	8.7	79.844	463.66
K	94.20	15.5	97.202	900.97
Rb	186.94	22.0	106.70	1293.1
Cs	281.81	30.3	118.50	2024.4
Tl	424.74	23.	27.33	768.9
Be	25.01	3.	176.40	1027.6
★Ca°	56.08	10.3	101.20	1246.6
★Ca'	56.08		10.90	1.21
Sr	103.62	15.0	105.81	1701.38
★Ba°	153.34	16.0	122.87	2380.7
★Ba'	153.34		17.38	72.52
Zn	81.37	11.0	73.96	868.2
★★Pb°	223.19	18.0	45.81	1220.1
★★Pb''	223.19		11.50	196.0

(续)

离子	氧化物分子量	$c$	$g$	$d$
Ga	187.44	6.0	80.91	1120.3
Mg	40.311	10.3	95.75	786.91
Y	225.81	14.0	86.63	1629.0
In	277.64	10.78	79.03	1460.1
As	197.84	17.91	100.50	2078.0
Sb	291.50	19.48	47.80	1379.0
Bi	465.96	16.0	40.57	1301.1
Fe	159.69	14.0	11.15	259.0
Si	60.08	+	145.685	1790.48
Ge	104.59	13.37	85.99	1453.9
Sn	150.69	10.28	68.74	1490.4
Zr	123.22	16.0	62.58	1539.0
Th	264.04	15.38	70.50	2023.4
P	141.94	15.45	179.90	2545.6
Nb	265.81	15.48	48.08	1382.8
Ta	441.89	22.0	55.60	1561.8
W	463.70	45.43	51.00	1586.0
B'	69.62	12.0	190.75	1413.49
B''	69.62	19.0	123.90	1067.18
Ag	231.74	12.72	52.46	792.2

注: Ca, Ba, Pb 氧化物折射率常数  $a_i$  ( $i$  代表相应离子) 与玻璃中该氧化物浓度  $N_i$  有关, 应按下式计算:

$$\star \quad a_i(\lambda) = d_i \left[ \frac{1}{g_i - 1/\lambda^2} - 4.8 \times 10^{-5} \lambda^2 \right] + \frac{d_i N_i}{g_i - 1/\lambda^2}$$

$$\star\star \quad a_i(\lambda) = d_i \left[ \frac{1}{g_i - 1/\lambda^2} - 4.8 \times 10^{-5} \lambda^2 \right] + \frac{d_i N_i}{g_i - 1/\lambda^2}$$

当  $N_B + N_{Si} > 0.5$  时

$$N_{B'} = 2 - 4N_{Si} - 3N_B \quad (5-47a)$$

$$N_{B''} = 4(N_{Si} + N_B) - 2 \quad (5-47b)$$

当  $N_B + N_{Si} < 0.5$  时

$$N_{B'} = N_B, N_{B''} = 0 \quad (5-47c)$$

当硼的含量加大时,必须加大硅常数的权重,即当  $N_B/N_{Si} < 0.55$  时有

$$N_{Si-B} = N_{Si} + N_B \quad (5-48a)$$

而当  $N_B/N_{Si} \geq 0.55$  时有

$$N_{Si-B} = N_{Si} + 0.85N_B \quad (5-48b)$$

这样,在给定玻璃成分配比后,如 Na-Al-Si 玻璃  $0.25Na_2O + 0.05Al_2O_3 + 0.70SiO_2$ ,由式(5-44b)计算出 Na、Al、Si 每摩尔氧中的摩尔数  $N_{Na}$ 、 $N_{Al}$  和  $N_{Si}$ ,再由表中查出它们的体积常数,并取退火常数  $k=0$ ,由式(5-44c)算出摩尔体积  $V$ ,查出折射率常数  $a_d$ ,和  $V$  一起代入式(5-44a)中,则可得到这种玻璃的折射率  $n_d = 1.5017$ 。

利用式(5-45)和表 5-4 中查出的常数  $d$ 、 $g$ ,还可以算出不同波长下折射率常数  $a(\lambda)$ ,代入式(5-44a)计算出不同波长下的折射率,从而计算出它的色散阿贝数。仍以前面提到的 Na-Al-Si 玻璃为例,可算出  $n_F - n_C = 0.00868$ ,  $\nu_d = 60.3$ ,  $Li^+ - Na^+$  完全交换后  $\nu_{GRIN} = -126$ 。

范同曾指出对每一对离子交换对都存在一个折射率不变量和色散不变量。对于给定的离子交换对  $A$  和  $B$ ,存在一个  $n_I$  值,它不受  $A$ 、 $B$  离子交换的影响;同样还存在  $(n_F - n_C)_I$  和  $(n_d - n_C)_I$  值,它们也不受离子交换的影响。这些不变量由以下公式确定:

$$n_{dI} = 1 + \frac{a_{dA} - a_{dB}}{c_A - c_B} \quad (5-49a)$$

$$(n_F - n_C)_I = \frac{(a_F - a_C)_A - (a_F - a_C)_B}{c_A - c_B} \quad (5-49b)$$

$$(n_d - n_C)_I = \frac{(a_d - a_C)_A - (a_d - a_C)_B}{c_A - c_B} \quad (5-49c)$$

这些值有时可能落在光学玻璃可见光波段真实折射率区间之外。例如  $Ag^+ - Na^+$  交换,  $n_{dI} = 3.48$ 。光学玻璃的真实折射率在可见

光区域没有超过 2.0 的值,因此所有玻璃中  $\text{Ag}^+ - \text{Na}^+$  交换后总是使折射率增大。但有时却不然,例如  $\text{K}^+ - \text{Na}^+$  交换  $n_d = 1.518$ 。如果玻璃基体的  $n_d = 1.518$ ,那么  $\text{K}^+ - \text{Na}^+$  交换在 d 谱线上不会产生折射率梯度,但可以产生梯度色散。 $\text{Li}^+ - \text{Na}^+$  交换是目前产生较小色散的离子交换对之一,它的  $(n_F - n_C)_I = 0.0106$ 。若基体玻璃的色散刚好等于该值,那么  $\text{Li}^+ - \text{Na}^+$  交换能够产生折射率梯度,但不能产生梯度色散,即梯度阿贝数  $\nu_{\text{GRIN}} = \infty$ 。

HSD 算法对开发新 GRIN 玻璃非常有用。用它可以选择合适的基体玻璃成分来产生所希望的光学特性。

### 5.3.3 离子交换对

#### 一、常见的几种离子交换对

目前能参加离子交换的一价离子有七种。一般说来它们对折射率的影响与其离子半径  $r$  和极化率  $\chi$  有关,随  $\chi/r^3$  的增大而增大。把它们按顺序列于表 5-6 中,并把 HSD 算法中的折射率常数  $a_d$  也列于表中。可以看出,  $a_d$  的变化规律与  $\chi/r^3$  基本相同,  $a_d$  直接反映了该离子对玻璃折射率的影响。这说明上述两种观点是一致的。

表 5-6 一价金属离子的部分参数<sup>[5.21,5.22]</sup>

离子	$a_d$	$r/\text{nm}$	$\chi \times 10^{-3}$ / $\text{nm}^3$	$\chi/r^3$	$\Delta n_{\text{max}}$	交换对
Tl	31.43	0.149	5.2	1.572	0.11	$\text{K}^+ - \text{Tl}^+$
Ag	15.97	0.126	2.4	1.200	0.15	$\text{Ag}^+ - \text{Na}^+$
Cs	17.47	0.165	3.34	0.744	0.043	$\text{Cs}^+ - \text{K}^+$
Rb	12.43	0.149	1.98	0.599	/	/
K	9.537	0.133	1.33	0.565	0.008	$\text{K}^+ - \text{Na}^+$
Na	6.017	0.095	0.43	0.478		
Li	4.60	0.065	0.03	0.109	0.012	$\text{Li}^+ - \text{Na}^+$

考虑到离子半径的差异、扩散系数的差异等因素,实际用作离子交换对的主要有:  $\text{Li}^+ \rightleftharpoons \text{Na}^+$ ,  $\text{Ag}^+ \rightleftharpoons \text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+ \rightleftharpoons \text{Tl}^+$ ,  $\text{K}^+ \rightleftharpoons \text{Cs}^+$ 。 $\text{K}^+ \rightleftharpoons \text{Li}^+$  或  $\text{Na}^+$  也可用作交换对,但由于  $\text{K}^+$  半径比  $\text{Li}^+$ 、 $\text{Na}^+$  都大,在浓度稍大时就会产生很大应力,甚至出现裂纹,因此采用较

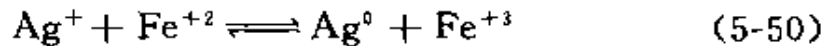
少。 $K^+—Ti^+$ 和 $Ag^+—Na^+$ 交换产生的折射率差最大,色散也大。 $Cs^+—K^+$ 交换折射率差比以上两者都小,但比 $Li^+—Na^+$ 交换大,且色散也较小。 $Li^+—Na^+$ 交换的折射率差最小,色散也最小。

## 二、 $Li^+—Na^+$ 交换中 GRIN 与玻璃成分关系

$Li^+—Na^+$ 交换时折射率差的大小和色散大小与玻璃成分有很密切的关系,而对于其它离子交换来说这种现象并不明显。例如 $Li^+—Na^+$ 在肖特 BK7 玻璃中交换时,用 HSD 算法计算出 $\Delta n_{\max}=0.008$ , $\nu_{GRIN}=-94$ 。在肖特 SFN64 玻璃中交换时,计算出的 $\Delta n_{\max}=0.017$ , $\nu_{GRIN}=30^{[5.21]}$ 。而这两种玻璃的 $Na_2O$ 含量基本相同。但 $Ag^+—Na^+$ 在上述两种玻璃中交换时计算其 $\Delta n_{\max}$ 分别为 0.053 和 0.055, $\nu_{GRIN}$ 分别为 17.7 和 18.7<sup>[5.21]</sup>。可以看出在 $Li^+—Na^+$ 交换中,玻璃中的其它成分对 GRIN 有明显影响。而在 $Ag^+—Na^+$ 交换中则影响不大。这是因为 $Li^+—Na^+$ 和 $Ag^+—Na^+$ 交换中它们的体积常数变化量 $\Delta c$ 对折射率变化的影响程度不同。 $Li^+$ 和 $Na^+$ 的折射率常数分别为 $a_{Li}=4.6$ , $a_{Na}=6.0$ 。由式(5-44a)可以看出,在 $Li^+—Na^+$ 交换中若不考虑体积变化的影响, $Li^+$ 浓度的增加不但不会增大,反而会减小玻璃的折射率。事实上,玻璃折射率的增大是由体积变化引起的,这一点可以从式(5-44c)看出:由于 Li 的体积常数( $c_{Li}=3.7$ )小于 Na 的体积常数( $c_{Na}=8.7$ ),因而当 $Li^+$ 的浓度增大时,将使玻璃的摩尔体积 $V$ 减小,从而导致玻璃折射率的增大。至于折射率改变的程度,还与体积常数变化量 $\Delta c$ 对玻璃摩尔体积变化量的影响程度有关。当 $V$ 较大时, $\Delta c$ 对其影响较小,由此而引起的折射率差 $\Delta n$ 就小。反之,当 $V$ 较小时,同样的 $\Delta c$ 对 $V$ 变化的贡献就大得多。因此,在不同牌号玻璃中,即使玻璃中 $Li^+$ 的浓度相同,其折射率差也会不同。但是,在 $Ag^+—Na^+$ 交换时情况就不同,它们的折射率常数分别为 $a_{Ag}=16.4$ , $a_{Na}=6.1$ ,两者相差较大,因而引起折射率变化的主导因素是折射率常数的差异,而不是体积的变化。因此,玻璃其它成分对折射率影响不明显。对不同牌号玻璃,只要 $Na_2O$ 含量相同,交换后的 $\Delta n$ 差异不大。

### 三、 $\text{Ag}^+ - \text{Na}^+$ 交换中的着色问题

在一般玻璃中  $\text{Ag}^+ - \text{Na}^+$  交换后, 当  $\Delta n > 0.05$  时, 玻璃中会出现黄色甚至棕色, 且  $\Delta n$  越大颜色越深。Ag 原子的吸收带在 410nm。离子交换中引入玻璃的  $\text{Ag}^+$  被还原成 Ag 原子, 增大了对蓝光的吸收而呈黄色。至于引起  $\text{Ag}^+$  还原的原因, 早期曾有人指出<sup>[5.23]</sup>, 玻璃中的高价金属离子, 例如 FeO 中的  $\text{Fe}^{+2}$ , 会给  $\text{Ag}^+$  提供电子使其还原



许多玻璃中都含有  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Nb}_2\text{O}_5$ ,  $\text{As}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Sb}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgO}$  等, 如果这些玻璃用作  $\text{Ag}^+ - \text{Na}^+$  交换, 则这些氧化物含量应该尽量低。这种解释对少量  $\text{Ag}^+$  的还原显然是合理的。但目前  $\text{Ag}^+ - \text{Na}^+$  交换引入了大量  $\text{Ag}^+$ , 而且引入的  $\text{Ag}^+$  越多 ( $\Delta n$  越大), 黄色越深, 这种“杂质说”就不能令人信服了。

阿罗基(Araujo)<sup>[5.24]</sup>则提出一种新观点, 他认为使  $\text{Ag}^+$  还原的电子是玻璃中的价电子带提供的。在硅玻璃中含有大量  $\text{Tl}^+$  或碱金属氧化物而未发生化学还原反应, 而在碱硅酸盐玻璃中却出现  $\text{Ag}^+$  的化学还原。实验表明硅玻璃和碱硅玻璃中的能带间隙不同, 碱硅酸盐玻璃中的能带间隙减小。由于单价碱金属离子的存在而改变了氧的状态, 称为非桥键氧(NBO), 如图 5-6(a)所示, 同时

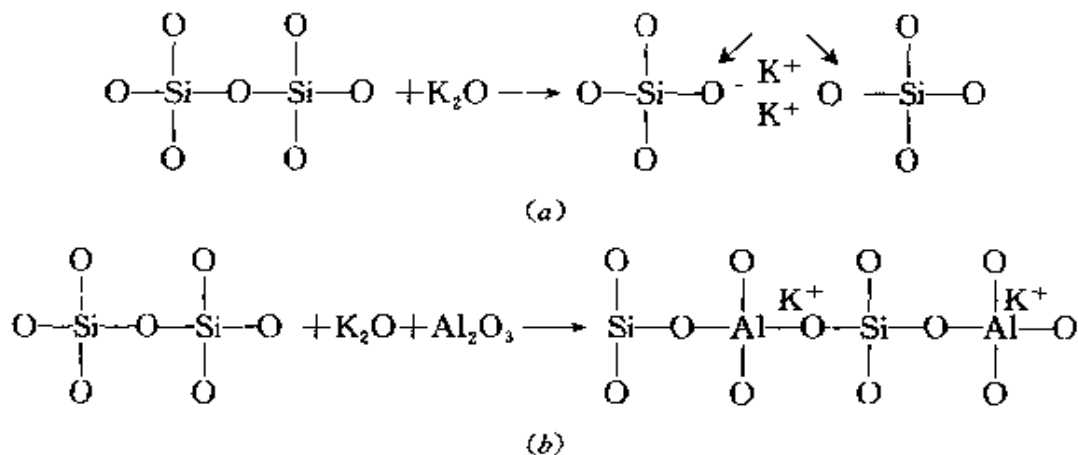


图 5-6 碱硅酸盐玻璃结构<sup>[5.24]</sup>

(a) 添加  $\text{K}_2\text{O}$  形成非桥键氧原子;

(b) 添加等量的  $\text{K}_2\text{O}$  和  $\text{Al}_2\text{O}_3$  形成桥键氧原子。

引入了位于价带顶部的高能态,使能带间隙变小。在还原反应中,用电子势  $IP$  作为自由能变化的参数,它与金属的性质紧密相关,而  $Ag$  的  $IP$  最高,因此  $Ag$  最有可能从  $NBO$  原子中提取处于价带顶部高能态的电子而还原。 $IP$  值仅次于  $Ag$  的是  $Tl$ ,但  $Tl$  不会还原。两者间相差约  $1.5eV$ ,这说明只要使碱硅酸盐玻璃中处于价带顶部的电子能量减少  $1.5eV$  左右就有可能使  $Ag$  不还原。

解决这一问题的根本方法是消除或减少玻璃中  $NBO$  原子。某些高场强的离子,如  $Al^{+3}$ ,能够消除  $NBO$  原子,如图 5-6(b)所示。因希望一个  $Al$  原子能够除去一个  $NBO$  原子,所以可根据玻璃的组成计算碱硅玻璃中  $NBO$  数与金属原子的比

$$NBO = \frac{M_2O - Al_2O_3}{2 \times SiO_2 + 1.5Al_2O_3 + 0.5M_2O} \quad (5-51)$$

式中采用阳离子百分浓度。阿罗基提出了几种配方的碱铝硅酸盐和硼硅酸盐玻璃,并进行了  $Ag^+ - Na^+$  交换实验,发现有很好的消着色效果。但这些玻璃的熔炼温度和转换温度都很高,使用不便。北京理工大学也提出了几种硼硅酸盐玻璃的配方,进一步降低了熔炼温度,并进行了离子交换实验,取得了较好效果<sup>[5, 25]</sup>。

## 5.4 GRIN 棒透镜

### 5.4.1 工艺流程

用离子交换法制作具有径向梯度的棒透镜的主要步骤如图 5-7 所示。

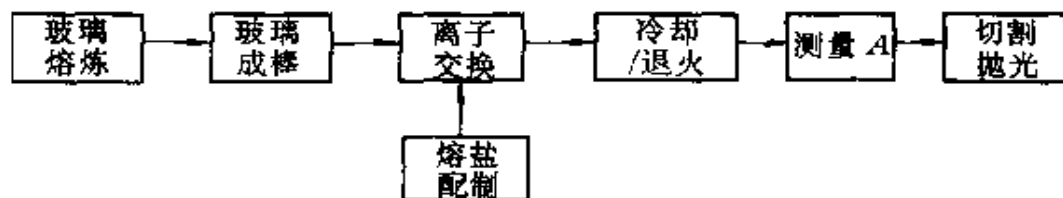


图 5-7 离子交换制作 GRIN 棒透镜工艺流程

### 一、玻璃熔炼

根据所需透镜性能选择玻璃配方,若需要正透镜,要求含 Tl、Ag、Cs 或 Li 的玻璃,以使用  $K^+—Tl^+$ 、 $Na^+—Ag^+$ 、 $K^+—Cs^+$  或  $Na^+—Li^+$  交换产生正折射率梯度。若需要负透镜,则应配制含 Na 或 K 较多的玻璃,以使用  $Tl^+—K^+$ 、 $Ag^+—Na^+$ 、 $Cs^+—K^+$  或  $Li^+—Na^+$  交换产生折射率负梯度。选定配方,用 HSD 算法预计玻璃的  $n_d$ 、 $\Delta n$  及  $\nu_d$ 、 $\nu_{GRIN}$ ,并可做适当调整。熔炼时选择铂或高纯钢玉坩埚,尽量减少高价金属离子的污染。

### 二、玻璃成棒

按透镜直径要求将基体玻璃制成圆棒形。目前 GRIN 棒透镜的直径从零点几毫米到几毫米。成型方法可用拉丝,也可用切割、研磨、抛光的常规光学方法。前者工艺简单并可大批量生产,但在控制棒直径一致性上较困难。后者费工费时,但可控制直径均匀性,适于小批量生产。

### 三、熔盐的选择

选择交换用一价金属盐时,首先考虑它们的熔点和沸点应与离子交换温度相适应。例如交换温度在  $350^\circ\text{C} \sim 500^\circ\text{C}$ ,采用  $\text{KNO}_3$  作熔盐是合适的,因其熔点为  $334^\circ\text{C}$ 。当离子交换温度在  $250^\circ\text{C} \sim 400^\circ\text{C}$  时, $\text{AgNO}_3$  比较合适,因其熔点为  $212^\circ\text{C}$ 。但交换温度在  $400^\circ\text{C}$  以上时再用  $\text{AgNO}_3$  就不合适了,因其沸点在  $444^\circ\text{C}$ ,高温下它极易挥发。此时多采用  $\text{AgCl}$  或混合盐。混合盐是指除了离子交换所需的主要一价金属盐外,再添加一定比例的另外一种或两种盐。采用混合盐有许多优点,其一是可调节熔盐的熔点,例如纯  $\text{AgCl}$  的熔点为  $456^\circ\text{C}$ ,纯  $\text{ZnCl}_2$  的熔点为  $318^\circ\text{C}$ ,而混合后共熔点会降低,如图 5-8 所示。60%  $\text{AgCl}$  时达最低共熔点  $248^\circ\text{C}$ 。其二是可以改变玻璃表面的离子交换反应的化学平衡常数  $K$ ,以促进或抑制离子交换,最终起到控制折射率分布的作用(见 5.4.3 节)。

### 四、离子交换

离子交换设备如图 5-9 所示。先将母棒与盛熔盐的容器一同放入离子交换炉内,然后升温至离子交换所需温度。待熔盐完全熔



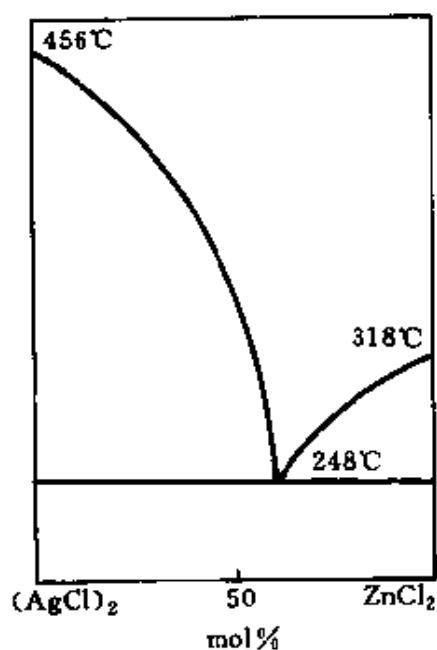


图 5-8  $\text{AgCl} + \text{ZnCl}_2$  混合盐相图<sup>[5.26]</sup>

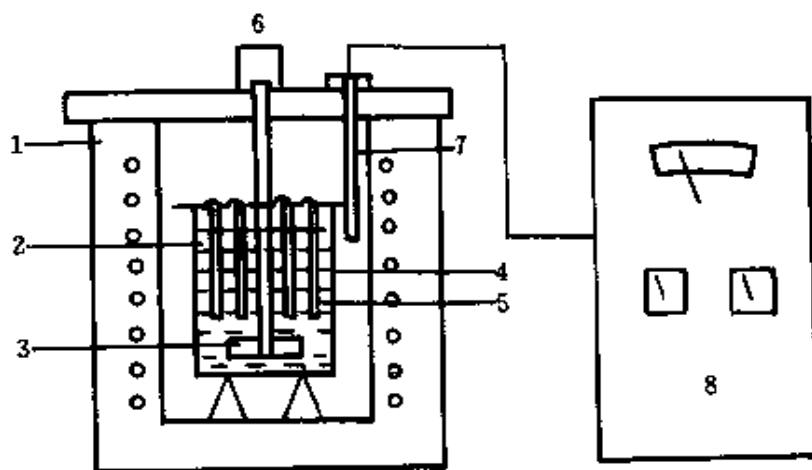


图 5-9 离子交换设备示意图

1—离子交换炉；2—容器；3—搅拌器；4—熔盐；  
5—母棒；6—电机；7—热电偶；8—温控仪。

化后，将母棒放入熔盐内。在交换过程中，若能连续或间断地搅拌熔盐，则可以保证玻璃表面附近的熔盐中离子浓度的稳定。搅拌器用铂或石英制成，以防止其它金属离子的污染。整个交换过程由温

控仪自动控制。

### 五、冷却与退火

在达到离子交换所需时间后,将玻璃棒从熔盐中取出,仍放在交换炉内。关断电源,自然冷却至室温。有时将已交换好的玻璃棒再送入退火炉中进行退火处理,以改善折射率的分布(见 5.4.3 节)。

### 六、测量 $A$ 系数

取一根交换后的玻璃棒,制成切片,测量折射率分布,并按式(5-9)拟合,求出折射率分布系数  $A$ 。由式(5-10)可知周期长度  $P = 2\pi/\sqrt{A}$ 。

### 七、切割和抛光

根据透镜所需周期长度,如  $0.23P$ ,  $0.25P$  或  $0.5P$ ,截取棒长,经研磨、抛光可制成 GRIN 棒透镜。

## 5.4.2 离子交换时间的确定

为保证离子交换刚好到中心,必须确定交换时间。由式(5-43)给出的交换到中心的条件,若已知扩散系数  $D$ ,则可算出交换到中心所需时间

$$t_0 = 0.81a^2/D \quad (5-52)$$

也可在正式交换之前用相同玻璃棒做一稍短时间的交换实验,使其尚未交换到中心。从干涉图上可测出此时交换所达位置  $r_1$  (即里边第一个干涉环半径),棒边缘折射率  $n_2 = n_0 - \Delta n$ 。若交换时间为  $t_1$ ,此时有  $n(r_1, t_1) = n_0$ 。将  $r_1$ 、 $n_2$ 、 $n(r, t)$  以及式(5-40a)和式(5-40b)代入式(5-39)可导出

$$D = \frac{1}{t_1} \left( \frac{a}{\alpha_1} \right)^2 \ln \left\{ \frac{2}{\alpha_1 J_1(\alpha_1)} \left[ 1 - \left( \frac{\alpha_1}{2} \right)^2 \left( \frac{r_1}{\lambda} \right)^2 \right] \right\} \quad (5-53)$$

这样即可用扩散系数  $D$  和棒直径  $2a$ ,由式(5-52)确定所需交换时间  $t_0$ 。

### 5.4.3 折射率分布控制

由扩散方程的解式(5-39)、式(5-40a)和式(5-40b)可以看出折射率分布与棒直径  $2a$ 、扩散系数  $D$ 、扩散时间  $t$ ，以及棒中心和边缘折射率有关。在离子交换对和玻璃成分确定后，扩散系数  $D$  与交换温度有关。为了使离子交换刚好达到中心，当扩散系数和棒直径确定后，交换时间也就被确定了。交换后的玻璃棒在无熔盐的情况下可以在一定温度下继续扩散过程，从而改变折射率分布，这称为交换后的退火技术。如果离子交换刚好进行到中心，那么  $n_0$  仅与玻璃成分有关。如果玻璃表面的离子交换是完全的、一对一的，那么边缘折射率  $n_1$  仅与玻璃成分有关。但实际情况往往不是一对一的完全交换，这与化学平衡常数  $K$  有关，也就是与熔盐中各种阴阳离子浓度有关。控制径向梯度折射率的方法主要有：控制离子交换温度，交换后退火技术，控制基体玻璃成分以及混合熔盐技术。

#### 一、离子交换温度对折射率分布的影响

由式(5-27)可知，温度升高必然使扩散系数增大，因而有利于玻璃表面的离子交换反应和玻璃内部的离子扩散过程。因此一般情况下总是希望离子交换温度尽量高，使它尽量接近玻璃的转换温度(低于软化温度)。温度降低则会使离子交换过程不充分，扩散深度减小。

#### 二、交换后退火技术

离子交换之后，将表面残留熔盐去除干净放在退火炉中，在一定温度下保持一定时间，然后再缓慢冷却至室温。这实际上是在无外部离子源的情况下，玻璃内部离子继续扩散的过程。选取不同退火温度和退火时间，会产生不同的效果。图 5-10 为一样品退火前后折射率分布的测量结果。样品采用铝硅酸盐玻璃在  $\text{AgCl}$  熔盐中、 $515^\circ\text{C}$  条件下交换 39.5h。然后在退火炉中  $515^\circ\text{C}$  温度下保持 10h，再用 12h 冷却至室温<sup>[5.37]</sup>。从图中可见它是以牺牲最大折射率差换取更大扩散深度来改变折射率分布的。

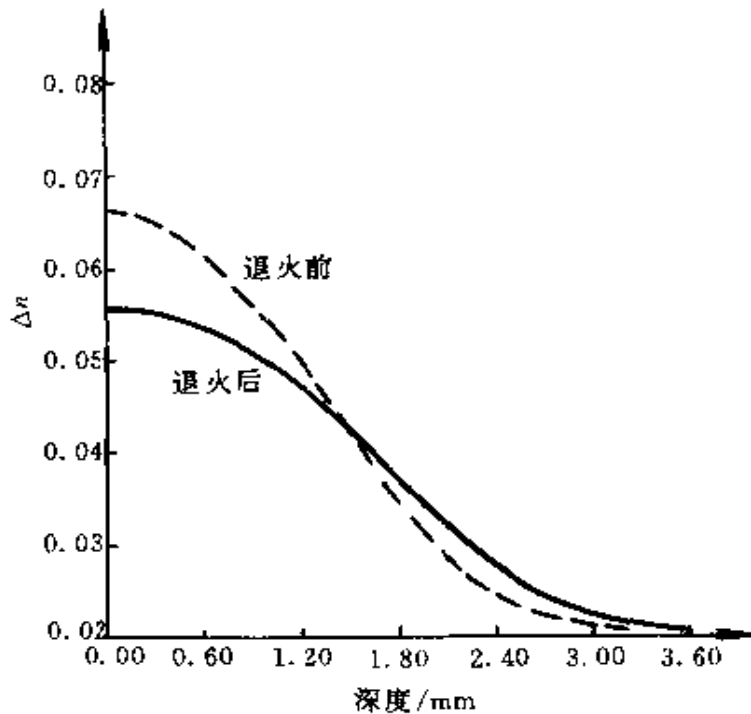


图 5-10 退火前后样品折射率分布比较<sup>[5.3]</sup>

### 三、基体玻璃成分对折射率分布影响

由 HSD 算法已知玻璃中  $\text{Li}_2\text{O}$  浓度的提高,将使折射率增大。在基体玻璃中提高  $\text{Li}_2\text{O}$  含量保持碱金属氧化物( $\text{Li}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$ )整体含量不变,折射率和其它光学性质基本接近,但  $\text{Li}^+ - \text{Na}^+$  交换后最大折射率差则变小,这就使折射率分布曲线向高折射率段移动且变缓。图 5-11 是实验测量结果<sup>[5.30]</sup>。实验中使用块状玻璃,其配比为  $(0.25-x)\text{Na}_2\text{O} + x\text{Li}_2\text{O} + 0.05\text{Al}_2\text{O}_3 + 0.70\text{SiO}_2$  (mol%),  $x=0.0, 0.1, 0.15, 0.20$ 。熔盐和交换温度都相同。图中横坐标扩散深度对扩散时间作了归一化处理,以便于比较。可以看出,  $x=0$  时,折射率低的下部曲线向上凸起,明显偏离了余误差函数曲线。其它三条则相当于  $x=0$  曲线高折射率段的延伸,折射率差随  $x$  增大而变小,曲线斜率变缓。但三者与余误差函数曲线都很相似。 $x=0$  曲线在低折射率段凸起而偏离余误差函数形式,反映了折射率与浓度之间的非线性关系。在 Ti—Si 玻璃上<sup>[5.28]</sup>和 Al—B 玻璃上<sup>[5.19]</sup>也做过类似的实验,得到了相似的结果。尽管这些实验结果

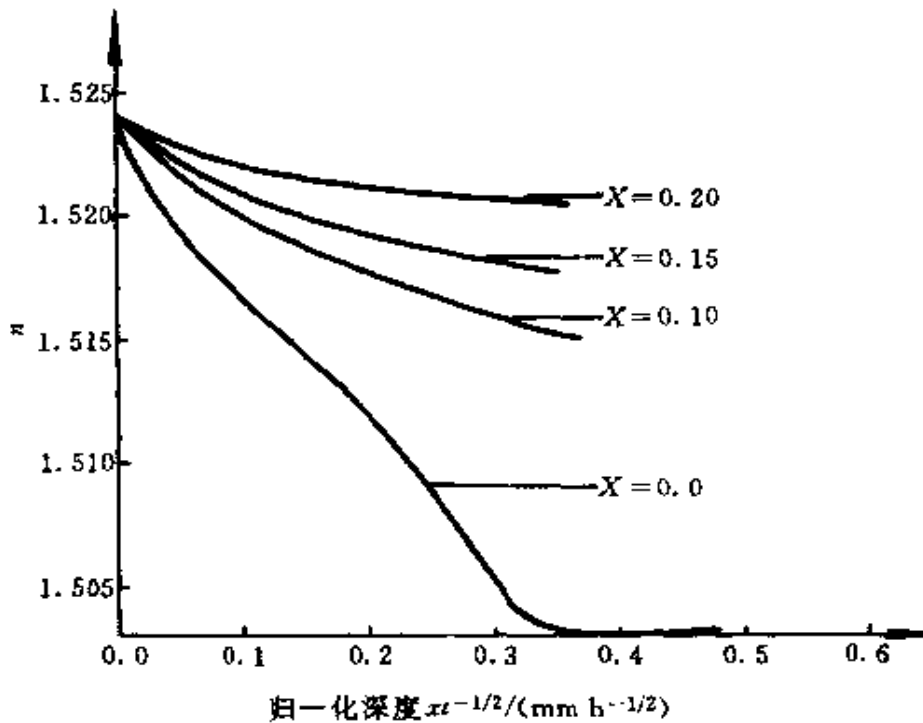


图 5-11 不同  $\text{Li}_2\text{O}$  含量的 Al—Si 玻璃  
 $\text{Li}^+ - \text{Na}^+$  交换折射率分布比较<sup>[5, 27]</sup>

都是在块状玻璃(轴向梯度)条件下得到的,但利用 Ti—Si 玻璃做过径向梯度实验,结果相似。因而可以相信这种方法在控制径向折射率分布时也是有效的。

#### 四、混合盐对折射率分布影响

由 5.2.2 节已经知道,采用混合盐可以改变玻璃的平衡常数,从而可控制离子交换的程度,起到控制折射率分布的作用。例如在  $\text{AgNO}_3$  或  $\text{AgCl}$  中加不同比例的  $\text{NaNO}_3$  或  $\text{NaCl}$ ,可以起毒化作用,抑制  $\text{Ag}^+ - \text{Na}^+$  交换程度,减小折射率差  $\Delta n$ 。图 5-12 是 BL-2406 (Na—Al—Si) 玻璃在  $(1-x)\text{AgCl} + x\text{NaCl}$  混合盐中进行  $\text{Ag}^+ - \text{Na}^+$  交换的实验结果<sup>[5, 11]</sup>。可以看出随  $\text{NaCl}$  浓度的增大,  $\Delta n$  变小。 $\text{NaCl}$  浓度为 5mol% 时  $\Delta n$  由纯  $\text{AgCl}$  时的 0.0823 减小到 0.0125。即使只有 0.5mol%  $\text{NaCl}$ ,  $\Delta n$  也会减小到 0.06(图中未画出)。可见  $\text{Na}^+$  的毒化作用很强。

更多的情况则是希望利用混合盐促进  $\text{Ag}^+ - \text{Na}^+$  交换,提高  $\Delta n$  值。如在  $\text{AgCl}$  中添加  $\text{ZnCl}_2$  来提高  $\Delta n$ 。表 5-7 中列出了 BL-

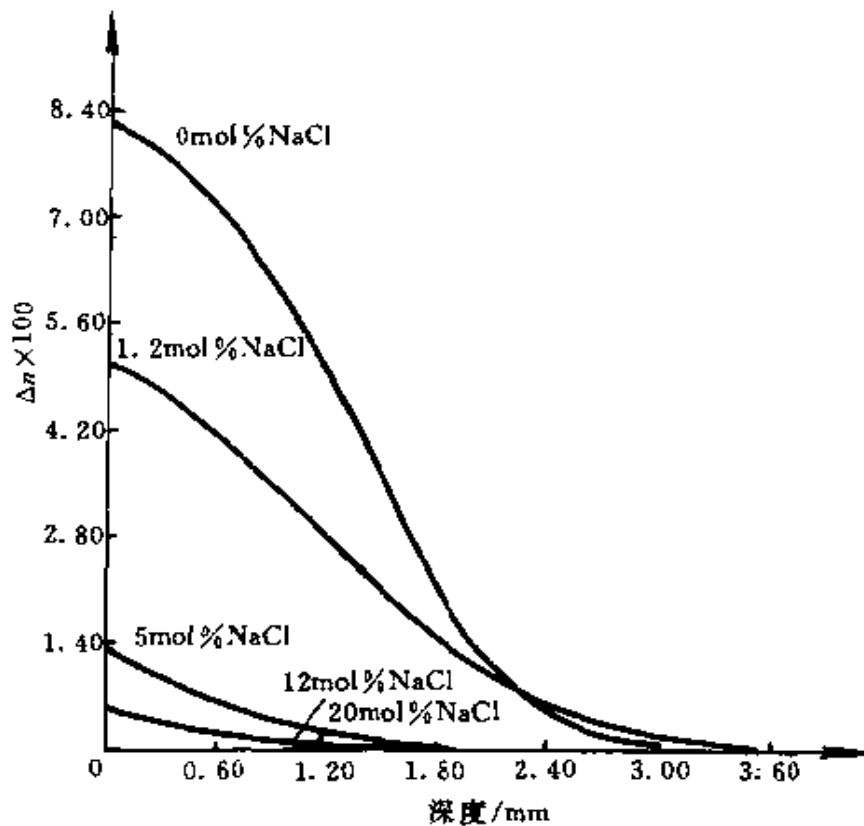


图 5-12 在不同浓度混合盐中  $\text{Ag}^+ - \text{Na}^+$  交换折射率分布比较<sup>[5.11]</sup>

2406 玻璃在  $\text{AgCl} + \text{ZnCl}_2$  混合盐中交换的实验结果<sup>[5.13]</sup>。实验条件为：交换温度  $500^\circ\text{C}$ ，交换时间为 40h。从 SHW 两样品可看出，采用 1 : 1 的  $\text{AgCl} + \text{ZnCl}_2$  混合盐， $\text{AgCl}$  从 430g 减少到 76g，却能得到同样的交换效果—— $\Delta n$  相同。这样可以大大节省  $\text{AgCl}$ ，降低离子交换成本。由 JS 两个样品可以看出，采用等量的  $\text{AgCl}$ 、 $\text{ZnCl}_2$  以后，其折射率明显提高。

表 5-7 在  $\text{AgCl} + \text{ZnCl}_2$  混合盐中  $\text{Ag}^+ - \text{Na}^+$  交换结果比较<sup>[5.13]</sup>

样 品	$\text{AgCl}/\text{g}$	$\text{ZnCl}_2/\text{g}$	$\Delta n$	玻璃面积 / $\text{cm}^2$	测量波长 / $\text{nm}$
SHW85—05	430	0	0.083	5.0	514.5
SHW BL—15	76	76	0.082	5.1	514.5
JS8A04	46.57	0	0.047	1.96	632.8
JS8AD04	46.57	30	0.071	1.96	632.8

采用  $\text{AgCl} + \text{Ag}_2\text{SO}_4 / \text{Ag}_2\text{CrO}_4$  混合盐则可获得更佳效果。图 5-13 是 BL-2406 玻璃在  $(1-x)\text{AgCl} + x\text{Ag}_2\text{SO}_4$  混合盐中交换的结果<sup>[5.13]</sup>。交换温度为  $500^\circ\text{C}$ ，交换时间为 24h。可以看出熔盐中  $\text{Ag}_2\text{SO}_4$  浓度越大，离子交换越充分，产生的  $\Delta n$  就越大。当  $\text{Ag}_2\text{SO}_4$  的浓度达到 21mol% 时， $\Delta n$  可达 0.149 ( $\lambda = 632.8\text{nm}$ )。这与用 HSD 算法得到的最大理论值  $\Delta n = 0.15$  已相差无几，这也反

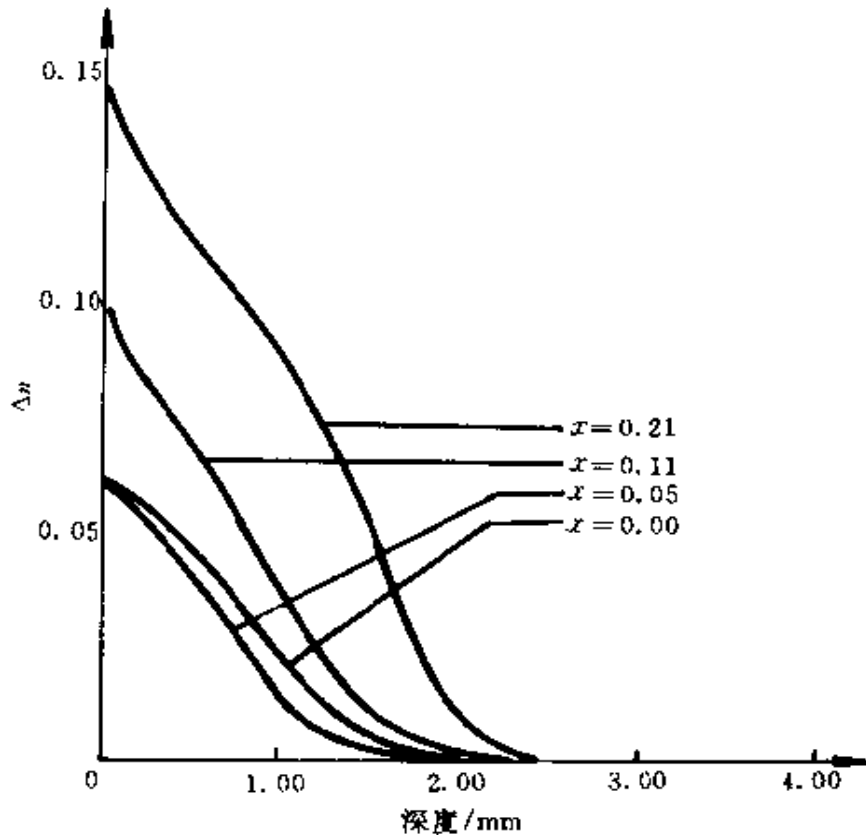


图 5-13 不同浓度的  $\text{AgCl} + \text{Ag}_2\text{SO}_4$  混合盐中交换结果<sup>[5.13]</sup>

应出它是一对一的理想交换情况。 $\Delta n$  与  $\text{Ag}^+$  的浓度呈线性关系。对  $\text{Ag}^+$  浓度的测量结果证实了这一点，如图 5-14 所示。图中直线为理论值(图 5-15 同)。反之，若用纯  $\text{AgCl}$  熔盐时，因未能充分交换，不仅导致  $\Delta n$  值减小，而且它与  $\text{Ag}^+$  浓度不呈线性关系，如图 5-15 所示。

对 Al-Si 玻璃中的  $\text{Li}^+ - \text{Na}^+$  交换也可采用混合盐方法控制折射率分布。图 5-16 给出  $3\text{YLiNO}_3 + (1.0 - Y)\text{NaNO}_3$  混合盐 ( $Y = 0.05, 0.10, 0.50$  和  $1.0$ ) 的实验结果<sup>[5.27]</sup>。为便于比较，图中

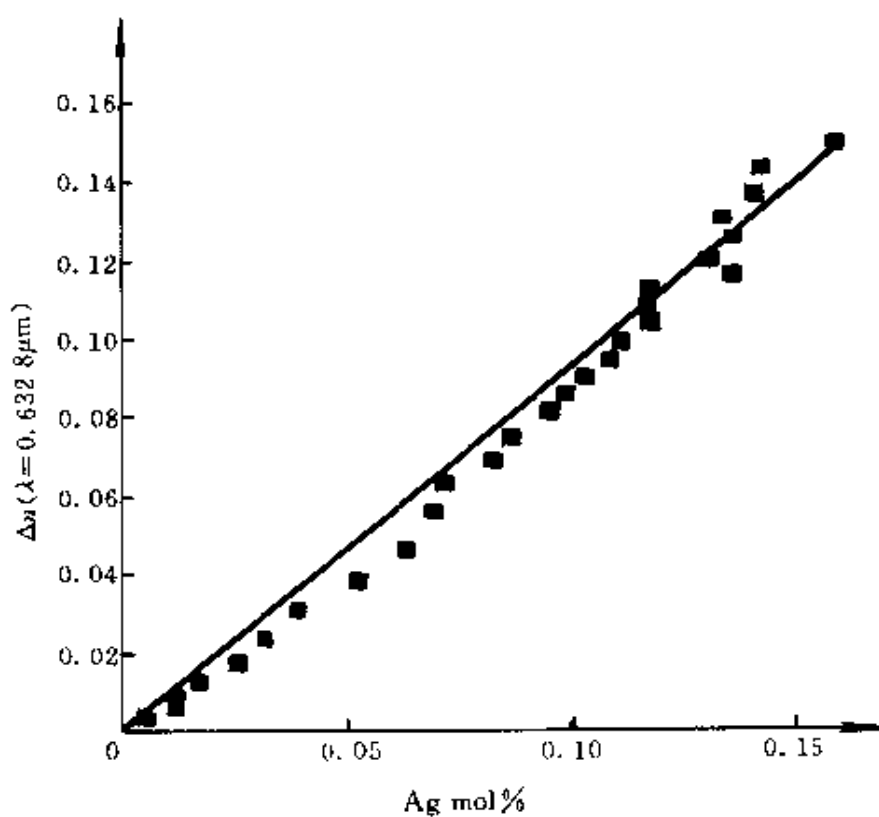


图 5-14  $\text{AgCl} + \text{Ag}_2\text{SO}_4$  熔盐中  $\text{Ag}^+$  浓度与  $\Delta n$  关系<sup>[5, 14]</sup>

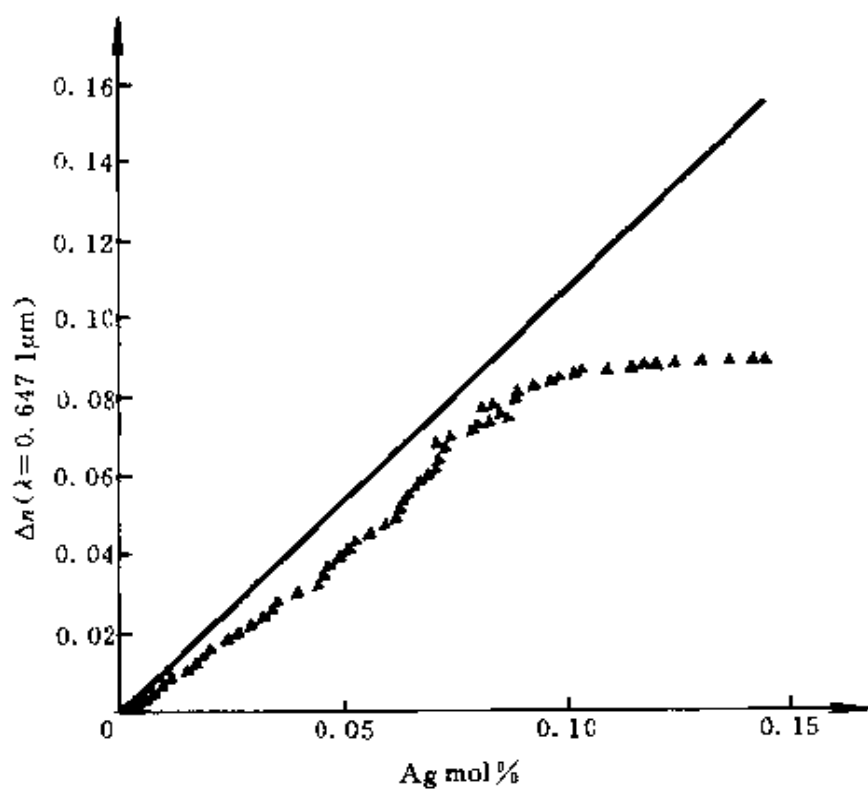


图 5-15 纯  $\text{AgCl}$  熔盐中  $\text{Ag}^+$  浓度与  $\Delta n$  关系<sup>[5, 15]</sup>



横坐标对扩散时间作了归一化。与  $\text{Ag}^+ - \text{Na}^+$  交换情况相似,  $\text{Na}^+$  在这里也起毒化作用, 随着  $\text{NaNO}_3$  浓度的增加, 折射率差减小, 且曲线形状也有所改变, 这说明不是理想的一对一交换,  $\Delta n$  与  $\text{Li}^+$  浓度不呈线性关系。测量分析结果也证实了这一推断<sup>[5, 20]</sup>。

上述这些方法都能有效地控制折射率分布, 但是它们与 GRIN 光学设计还无法直接地、定量地相联系, 这方面还有待进一步研究。

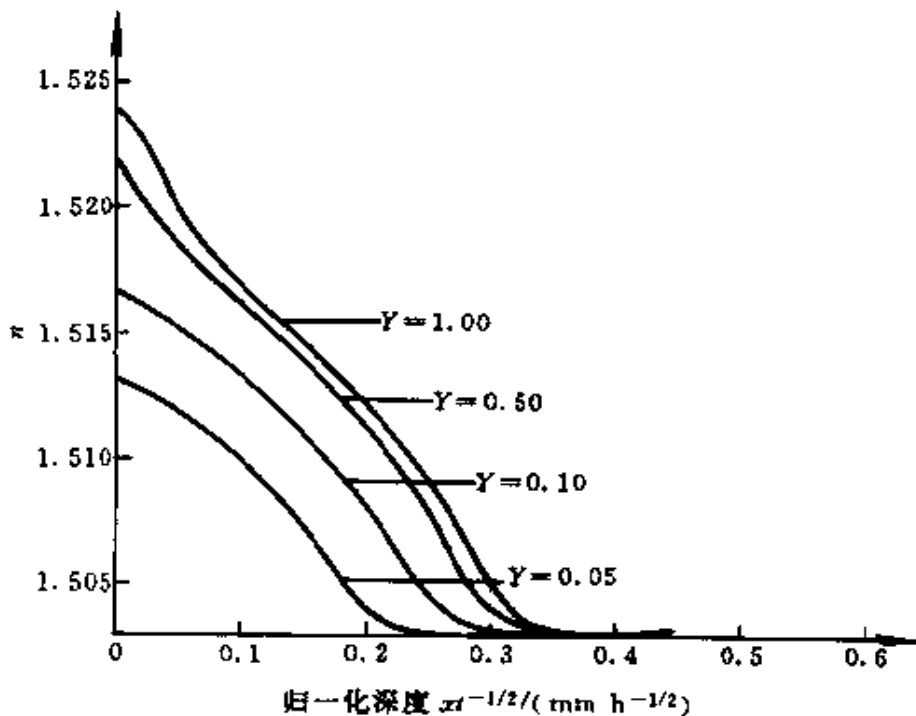


图 5-16 在不同浓度  $\text{LiNO}_3 + \text{NaNO}_3$  混合盐中交换结果比较<sup>[5, 27]</sup>

## 5.5 GRIN 微透镜阵列

最早的 GRIN 透镜阵列是用径向梯度棒透镜排列而制成, 如图 5-17, 它主要是用在小型复印机和传真机上<sup>[5, 7]</sup>。以后采用光集成离子交换技术, 将 GRIN 小透镜做在一块平板玻璃上, 习惯上称作 GRIN 微透镜阵列, 如图 5-18 所示。理想情况下其折射率分

布应为半球形。这些微透镜阵列目前主要是应用于光信息领域中，作为光并行处理的耦合器件。

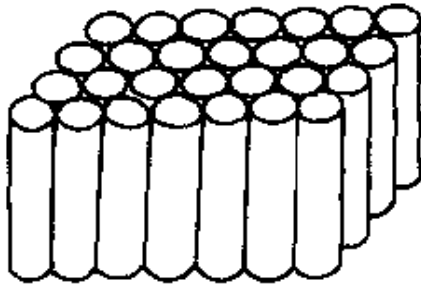


图 5-17 径向梯度棒透镜阵列

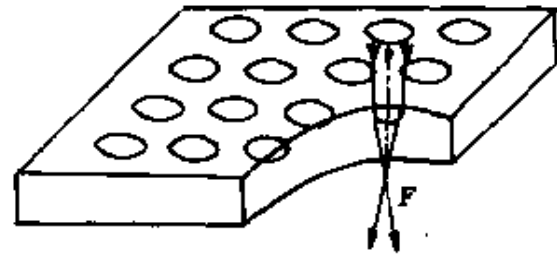


图 5-18 GRIN 平面微透镜阵列

### 5.5.1 有掩模无外场条件下扩散方程及其解

GRIN 平板微透镜可分为两类，一类是开孔式，另一类是掩盘式。开孔式是在金属掩模上开出圆孔阵列，金属模阻挡离子交换，只有开孔下面的玻璃可进行离子交换，最后形成透镜。掩盘式则相反，掩盘外玻璃可进行离子交换，而掩盘下形成 GRIN 透镜。为加速离子迁移并可控制折射率分布，往往施加外电场辅助交换。

对开孔式无外场离子交换，假定  $D$  为常数，采用柱坐标形式，将扩散方程式(5-24)写成

$$D \cdot \frac{\partial c}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial c}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} \quad (5-54)$$

此时初始条件和边界条件为

$$c(r, z, 0) = c_1 \quad r, z > 0 \quad (5-54a)$$

$$c(r, 0, t) = c_0 \quad r < a \quad t > 0 \quad (5-54b)$$

$$\frac{\partial c(r, 0, t)}{\partial z} = 0 \quad r > a \quad t > 0 \quad (5-54c)$$

式中  $a$  为掩模开孔半径。假定折射率与浓度成线性关系  $n(r) \propto c(r)$ ,  $n_0 \propto c_1$ ,  $n_1 \propto c_0$ ,  $\Delta n = n_1 - n_0$ , 则方程解可写成<sup>[5, 29]</sup>

$$\begin{aligned} n(r, z) = n_0 - \frac{\Delta n}{\pi} \int_0^\infty \frac{\sin au}{u} J_0(ru) \left[ \exp(-zu) \cdot \right. \\ \left. \operatorname{erfc} \left( \frac{z}{2\sqrt{Dt}} - u\sqrt{Dt} \right) - \exp(zu) \cdot \right. \\ \left. \operatorname{erfc} \left( \frac{z}{2\sqrt{Dt}} + u\sqrt{Dt} \right) \right] du \quad (5-55) \end{aligned}$$

当  $t \rightarrow \infty$  时, 称为稳态解, 即

$$n(r, z) = n_0 - \frac{2\Delta n}{\pi} \int_0^\infty J_0(ru) \frac{\sin au}{u} \exp(-zu) du =$$

$$n_0 - \frac{2\Delta n}{\pi} \sin \frac{2a}{\sqrt{(r-a)^2 + z^2} + \sqrt{(r+a)^2 + z^2}}$$
(5-56)

图 5-19 给出了根据公式(5-55)计算得到的透镜折射率分布曲线。

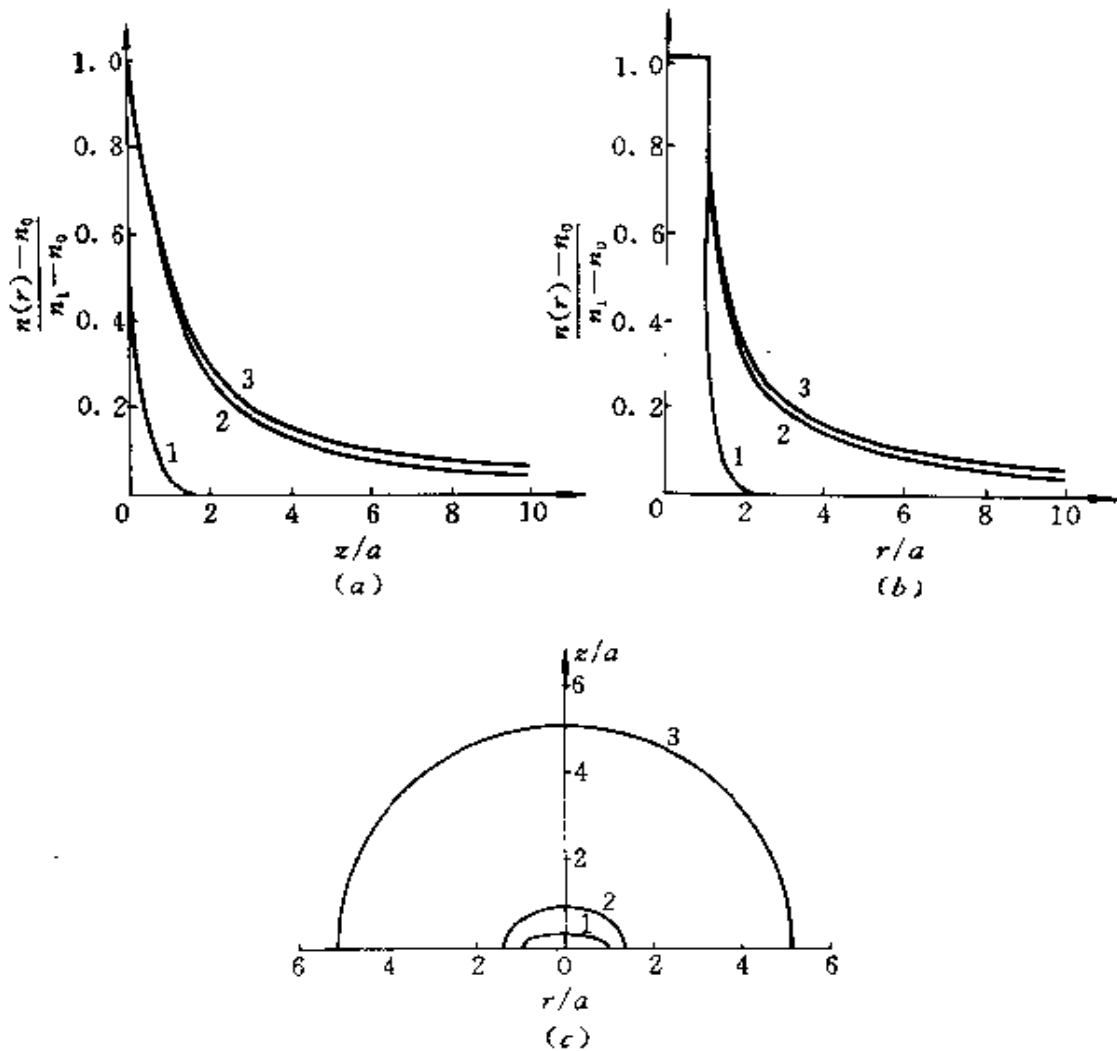


图 5-19 开孔式无场辅助离子交换折射率分布<sup>[5, 29]</sup>

(a) 轴上 ( $r=0$ )  $z$  方向分布;

(b) 表面 ( $z=0$ )  $r$  方向分布;

(c) 等折射率面 ( $\sqrt{Dt} = 15$ ).

图 5-19(a)和图 5-19(b)中曲线 1、2、3 分别为  $\sqrt{Dt}=0, 5, 15, \infty$  时沿  $z$  轴( $r=0$ )的折射率分布和表面( $z=0$ )径向折射率分布。图(c)为  $\sqrt{Dt}=15$  时的等折射率面。

事实上很多情况下扩散系数不是常数,而是与浓度有关。这种关系的半经验公式为

$$D = D_0 \exp(KN/N_0) \quad (5-57)$$

式中  $N$  为扩散离子浓度,  $N_0$  为饱和离子浓度,  $D_0$  为在  $N \ll N_0$  时的系数,  $K$  表示对浓度依赖程度的参数,一般取  $K=4.0 \sim 5.0$ 。将式(5-57)代入扩散方程式(5-24),得到更复杂的扩散方程,很难得到它的解析解,因而往往采用显式差分法数值求解<sup>[5.30]</sup>。

### 5.5.2 有掩模电场辅助离子交换扩散方程及其解

#### 一、一元扩散迁移方程

前面讨论的所有情况都是无外电场时的纯扩散过程。当引入外电场辅助交换时,扩散方程式(5-24)中则应增加电场作用引起的离子迁移项,方程变为

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \nabla \cdot [D \nabla c - \mu E c] \quad (5-58)$$

式中  $E$  为电场矢量,  $\mu$  为交换离子在此种玻璃中的迁移率,它与扩散系数之间满足诺斯特—爱因斯坦(Nerst—Einstein)关系:

$$\mu = eD/kT \quad (5-59)$$

式中  $e$  为电子电量,  $k$  为玻耳兹曼常数,  $T$  为绝对温度。将式(5-58)变换到柱坐标中,此时的边界条件和初始条件分别为

$$\begin{aligned} C(\rho, \xi, 0) &= c_1/c_0 = C \\ C(\rho, 0, \tau) &= 1 \quad (\rho > 1, \tau > 0) \\ \frac{\partial C}{\partial \tau}(\rho, 0, \tau) &= 0 \end{aligned}$$

假定扩散系数与浓度关系满足式(5-57),利用显式差分可以对加场扩散方程数值求解<sup>[5.30]</sup>。

#### 二、二元扩散迁移方程

扩散方程(5-24)是只考虑一种离子的扩散过程而建立的,称之为二元扩散理论。对于离子交换时玻璃中有两种离子相互扩散的过程,采用式(5-57)引入扩散系数与浓度的关系来加以修正;而式(5-57)是半经验公式,其中  $K$  的取值带有主观性,因而采用一元扩散理论有时带有一定局限性。采用二元扩散理论,在扩散方程中同时考虑两种离子的扩散和迁移过程,则物理图像更为清晰可靠。

设玻璃中两种交换的离子的浓度分别为  $c_A$  和  $c_B$ , 交换前玻璃中  $B$  离子浓度为  $c_0$ 。尽管两种离子扩散系数不同,扩散速度不同,但若能达到平衡,则仍可成为一对一交换的理想情况。此时玻璃中净电荷为零,各浓度之间关系为

$$c_A + c_B = c_0 \quad (5-60)$$

设  $j_A$  和  $j_B$  分别为玻璃中  $A$ 、 $B$  离子流密度(量纲为:浓度 $\times$ 速度),  $j$  为总离子流密度,则总电流密度  $i$  可表示为

$$i = e(j_A + j_B) = ej \quad (5-61)$$

无外电场时,无净离子流,即有  $j=0$ ; 有外电场时,离子流由扩散和电场力两种因素形成。两种离子在玻璃中的扩散系数和迁移率分别为  $D_A$ 、 $D_B$  和  $\mu_A$ 、 $\mu_B$ , 离子流满足下式

$$j_A = -D_A \nabla c_A + \mu_A E c_A \quad (5-62a)$$

$$j_B = -D_B \nabla c_B + \mu_B E c_B \quad (5-62b)$$

将式(5-59)代入式(5-62a)、式(5-62b)两式可得

$$E = \frac{kT}{e} \cdot \frac{j + \nabla s}{s} \quad (5-63)$$

由离子数守恒,可得两种离子的扩散迁移方程

$$\frac{\partial c_A}{\partial t} = c_0 D_A D_B \left[ \frac{\nabla^2 c_A}{s} + D_B (1 - M) \frac{(\nabla c_A)^2}{s^2} - \frac{j \cdot \nabla c_A}{s^2} \right] \quad (5-64a)$$

$$\frac{\partial c_B}{\partial t} = c_0 D_A D_B \left[ \frac{\nabla^2 c_B}{s} + D_B (1 - M) \frac{(\nabla c_B)^2}{s^2} - \frac{j \cdot \nabla c_B}{s^2} \right] \quad (5-64b)$$

$$\text{式中} \quad M = D_A/D_B \quad (5-65a)$$

$$s = D_{AC}A + D_{BC}B \quad (5-65b)$$

达到平衡时应有  $\alpha_A/\alpha = \alpha_B/\alpha$ 。

在圆柱坐标系下,扩散迁移方程(5-64a)为

$$\begin{aligned} \frac{\partial C_A}{\partial t} = & D_A D_B \left\{ \frac{1}{S} \left[ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial C_A}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 C_A}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 C_A}{\partial z^2} \right] + \right. \\ & \frac{D_B(1-M)}{S^2} \left( \frac{\partial C_A}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial C_A}{\partial \theta} + \frac{\partial C_A}{\partial z} \right)^2 + \\ & \left. \frac{j}{S^2} \cdot \left( \frac{\partial C_A}{\partial r} e_r + \frac{\partial C_A}{r \partial \theta} e_\theta + \frac{\partial C_A}{\partial z} e_z \right) \right\} \end{aligned} \quad (5-66)$$

初始条件和边界条件为

$$C_A = \begin{cases} 1 & 2nL - a \leq r \leq 2nL + a, z = 0, t = 0 \\ 0 & \text{其它区} \end{cases} \quad (5-67a)$$

$$C_A \equiv 1 \quad 2nL - a \leq r \leq 2nL + a, z = 0, t > 0 \quad (5-67b)$$

其中  $S = s/c_0$ ,  $C_A = c_A/c_0$ ,  $C_B = c_B/c_0$ ,  $2a$  为圆孔直径,  $2L$  为圆孔中心距,  $n$  为圆孔数,如图 5-20 所示。

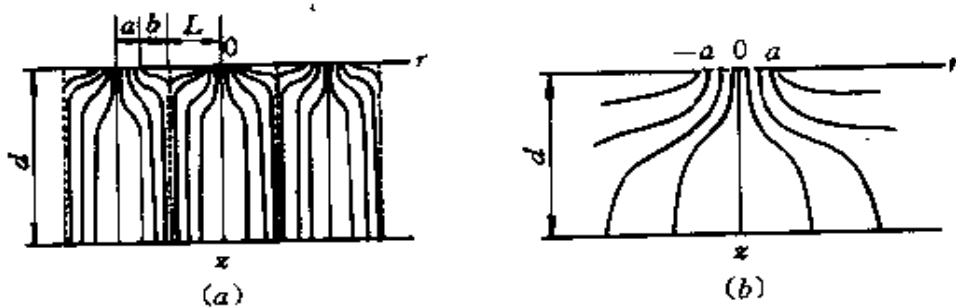


图 5-20 离子交换电场分布

(a)阵列电场;(b)单孔电场。

### 三、交换电场

对正方形排列的圆孔阵列,电场可用复函数表示<sup>[5.31]</sup>

$$E_r + jE_z = j \frac{u_0}{d} \frac{K(m)}{K'(m)} \left[ \frac{\tanh^2 p - 1}{\tanh^2 p - \tanh^2 q} \right]^{1/2} \quad (5-68)$$

其中  $j = \sqrt{-1}$ ,  $p = \pi(r - jz)/2d$ ,  $q = \pi a/2d$  ( $d$  为基片厚度),  $u_0$  为外加电压,  $K(m)$  是完全椭圆积分,  $K'(m)$  是其一阶导数。对于孤立开孔电场, 上式可简化为

$$E_r + jE_z = \frac{jau_0}{\sqrt{a^2 - (r - jz)^2}} \quad (5-69)$$

图 5-20 给出了两种情况下的电场分布。

#### 四、方程解

扩散迁移方程(5-65a)和式(5-66)右端第一、二项反映了离子扩散引起的浓度变化, 第三项是电场作用下离子迁移引起的离子浓度变化。求解该三维扩散方程是十分困难的, 若只分析沿基体玻璃表面和纵深方向两个分量( $e_r$  和  $e_z$ )则可使方程简化, 讨论也将方便得多, 因而可在主截面内求解扩散方程。分别在不同主截面内建立正交网络, 采用有限差分法数值求解扩散方程, 并讨论开孔半径、交换时间和外加电压等参量对浓度分布的影响。

以铝—硼—硅酸盐中  $\text{Ag}^+ - \text{Na}^+$  在  $480^\circ\text{C}$  温度下交换为例, 给出了一些计算结果<sup>[5, 31]</sup>。从这些计算结果可以看出, 外加电场对于轴向和横向扩散深度都有影响, 因此, 改变外加电压可以在一定程度上控制扩散深度, 从而控制折射率分布。还可以看出, 当微透镜阵列密度较大时, 相邻透镜之间对扩散迁移过程会产生相互影响。为使相邻透镜间距减小以提高透镜密度, 同时使轴向和横向扩散深度相似以得到接近球对称的浓度分布, 应选取适当的相对开孔半径  $a/2L$  以及合适的交换时间。

### 5.5.3 电场辅助离子交换制作平面微透镜阵列

#### 一、工艺流程

这里的离子交换部分与普通离子交换工艺相似, 主要区别在于: (1)带金属掩模有选择的局部区域扩散; (2)施加外电场, 因而必须有适当的容器和夹具。主要步骤见图 5-21 所示的工艺流程

图,其中镀膜、光刻、刻蚀工艺与集成光学中所用技术完全相同。电场辅助离子交换装置如图 5-22 所示。

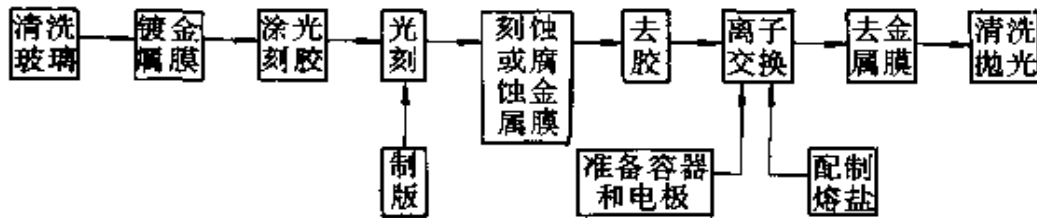


图 5-21 电场辅助离子交换制作平面微透镜阵列的工艺流程

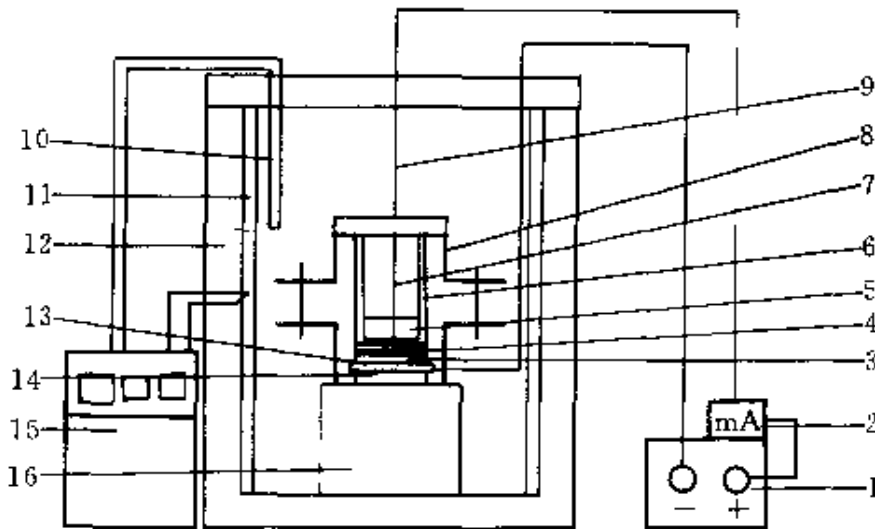


图 5-22 电场辅助离子交换装置示意图

- 1—直流电源;2—毫安表;3—衬板;4—基片;5—熔盐;6—陶瓷容器;  
7—铂金丝(阳极);8—夹具;9—镍铬丝;10—热电偶;11—电阻丝;  
12—炉体;13—铜板(阴极);14—绝缘板;15—温度控制仪;16—耐火砖。

## 二、金属掩模

在制作金属掩模时,要求它与玻璃之间有很好的附着性,不易脱落;在  $400\sim 500^{\circ}\text{C}$  高温熔盐中能耐腐蚀,而且在离子交换后又采用不太复杂的方法除去金属膜。通常用 Al 和 Ti 制作金属掩



模,而 Ti 在耐腐蚀性能方面更好些。尽管 Ti 的化学活性很高,但由于它的钝化性使之在许多介质中极其耐蚀,即使有  $\text{Cl}^-$  存在,其钝态也不受破坏<sup>[5.32]</sup>。为了提高 Ti 与玻璃之间的附着性,应在玻璃上先镀一薄层附着能力强的金属 Cr,再镀  $1\mu\text{m}$  左右的 Ti。Ti 膜可采用电子束蒸镀,也可采用离子束溅射。后者在镀膜前可用离子束清洗被镀层表面,而被镀金属原子带有较高能量,因而使膜层的附着性、均匀性和致密性都好。光刻后金属膜圆孔的形成可以用化学腐蚀,例如用热浓磷酸;也可以用干法刻蚀,例如用离子束刻蚀,后者可以得到尺寸精确边缘整齐的圆孔,效果较好。交换后保留下来的 Ti 膜可以在热  $\text{H}_2\text{PO}_3$  中溶解掉。

### 三、加场离子交换容器

在电场辅助离子交换制作平面微透镜工艺中,固定基体玻璃,使其与容器密封,以及可靠的电极连接是一个至关重要的问题。若容器密封不好,交换时有熔盐泄漏,会引起电极漏电以至电极短路,影响离子交换效果。电极连接不可靠会使离子交换中出现断路,失去电场作用。为此,必须设计加工可靠、可行的容器和夹具。

表 5-8 列出部分国产 GRIN 平面微透镜阵列样品的性能参数,其中 PSLA 样品的数值孔径比计算值要大,这是由于样品透镜表面凸起而造成的<sup>[5.33]</sup>。

表 5-8 部分国产 GRIN 微透镜样品性能参数

编号	开孔直径/mm	透镜直径/mm	交换深度/mm	焦距/mm	焦斑直径/ $\mu\text{m}$	分辨率/(线对/mm)	NA	$\Delta n$	透镜元数
PSLA-27	0.6	1.06	0.23	2.4	40	107	0.22	0.04	$18 \times 18$
PSLA-28	0.1	0.28	0.13	0.35	8	150	0.37	0.04	$35 \times 35$
PSLA-29	0.1	0.5		0.35			0.58		$35 \times 35$
PSLA-41	0.3	0.48		1.4		196	0.17		$35 \times 35$
SXC-01	0.4	0.80		3.15			0.077	0.036	$7 \times 7$
SXC-02	0.3	0.70		27.9			0.008	0.005	$>20 \times 20$

(续)

编号	开孔直径/mm	透镜直径/mm	交换深度/mm	焦距/mm	焦斑直径/ $\mu\text{m}$	分辨率/(线对/mm)	$NA$	$\Delta n$	透镜元数
SXC-03	0.2	0.43		15.48			0.008	0.005	$>20 \times 20$
SXC-04	0.5	1.0		11.26			0.006	0.004	$>20 \times 20$
SXC-05	0.38	0.86		2.23			0.071	0.012	$>20 \times 20$
SXC-06	0.38	0.70		2.21			0.115	0.022	$>20 \times 20$
SXC-07	0.2	0.40		1.45			0.054	0.035	$32 \times 32$
SXC-08	0.2	0.40		2.47			0.063	0.031	$32 \times 32$

注:表中样品编号为PSLA均引自文献[5.33]。SXC样品由北京理工大学提供。

## 5.6 用溶胶—凝胶法制造 GRIN 材料

### 5.6.1 溶胶—凝胶法的优缺点

用溶胶—凝胶法不仅可以制造折射率均匀的玻璃,还可以制造 GRIN 材料,它的基本思想是利用湿凝胶的多孔性使折射率调节离子(即网络外体或中间体离子)在孔中液相条件下扩散并交换,再将其干燥、烧结成型形成径向 GRIN 玻璃棒。

用溶胶—凝胶法制造 GRIN 的主要优点是:

(1) 折射率调节离子是在液相下交换并扩散,液相时扩散系数远大于固态时的扩散系数,因此在短时间里即可形成足够大的折射率梯度,且扩散深度也大大增加。这样,用溶胶—凝胶法可以制造较大直径的径向 GRIN 棒。离子交换法由于扩散系数的限制,成品 GRIN 棒的直径相对要小,一般在 3mm 以下,最常见为 1~2mm。而溶胶—凝胶法可做出直径为 7~8mm 乃至十几个毫米的 GRIN 棒,并不困难。

(2) 离子交换法中,实际上只有六种可用的一价金属离子来改变玻璃的折射率,因而限制了 GRIN 玻璃性能的变化范围。而溶胶—凝胶法由于液相扩散系数大,不仅一价离子,而且一些折射率

较高的多价离子如  $\text{Ti}^{4+}$ ,  $\text{Pb}^{4+}$ ,  $\text{Ge}^{4+}$ ,  $\text{Zr}^{4+}$  等均可在凝胶孔中自由扩散,因而拓宽了折射率调节离子的选择范围,使 GRIN 玻璃材料性能有更宽的覆盖面。

(3) 由于折射率梯度的形成是通过扩散和化学反应两种过程同时得到的,因而在控制折射率分布的手段上相对多一些。

但是目前溶胶-凝胶法也有其弱点,它的制作周期太长,一般要 7~10 天;成品硬度不够,易于破碎;成品的透明度还不如离子交换的成品,等等。这些问题都有待解决。

### 5.6.2 制作工艺

溶胶-凝胶法首先要制取含一种或几种折射率调节离子的多组分凝胶,然后把这种多孔的湿凝胶浸在含不同折射率调节离子的溶液中,使凝胶和溶液中的离子相互扩散,最后烘干并烧结形成具有梯度折射率的玻璃棒。

由于形成凝胶的成分不同,浸液和操作步骤也就不同,因此又可分为两种方法。一种是硅的醇盐通过水解形成凝胶骨架,以无机盐的形式掺入高折射率的调节离子,然后部分浸出这些调节离子,同时反向浸入另一种折射率较低的离子,形成浓度梯度。这种方法称之为无机盐凝胶法。另一种方法是将硅和高折射率金属如 Ti, Ge, Zr 等的醇盐以及中间体离子如铝、硼等的醇盐同时进行水解连成骨架,用酸部分浸出折射率调节离子形成梯度分布。此方法称之为醇盐凝胶法。

图 5-23 给出了第一种方法(无机盐凝胶)的具体工艺流程实例<sup>[5.34]</sup>,它是以铅 Pb 为折射率调节离子,由 Pb 外扩散来形成 GRIN 的。首先选用硅酸甲酯(TMOS)、硅酸乙酯(TEOS)、三氧化二硼( $\text{B}_2\text{O}_3$ )、醋酸铅水溶液、稀盐酸和醋酸作为制备凝胶的前体,并在聚乙烯管状容器中反应生成湿凝胶 I,再经过五天老化形成湿凝胶 II,此时的凝胶具有均匀玻璃成分,其配比为  $0.26\text{PbO} + 0.07\text{B}_2\text{O}_3 + 0.67\text{SiO}_2(\text{mol})$ 。然后开始 GRIN 的形成过程。第一步是将湿凝胶 II 浸在异丙醇水溶液中(该溶液中的醋酸铅 mol 浓度

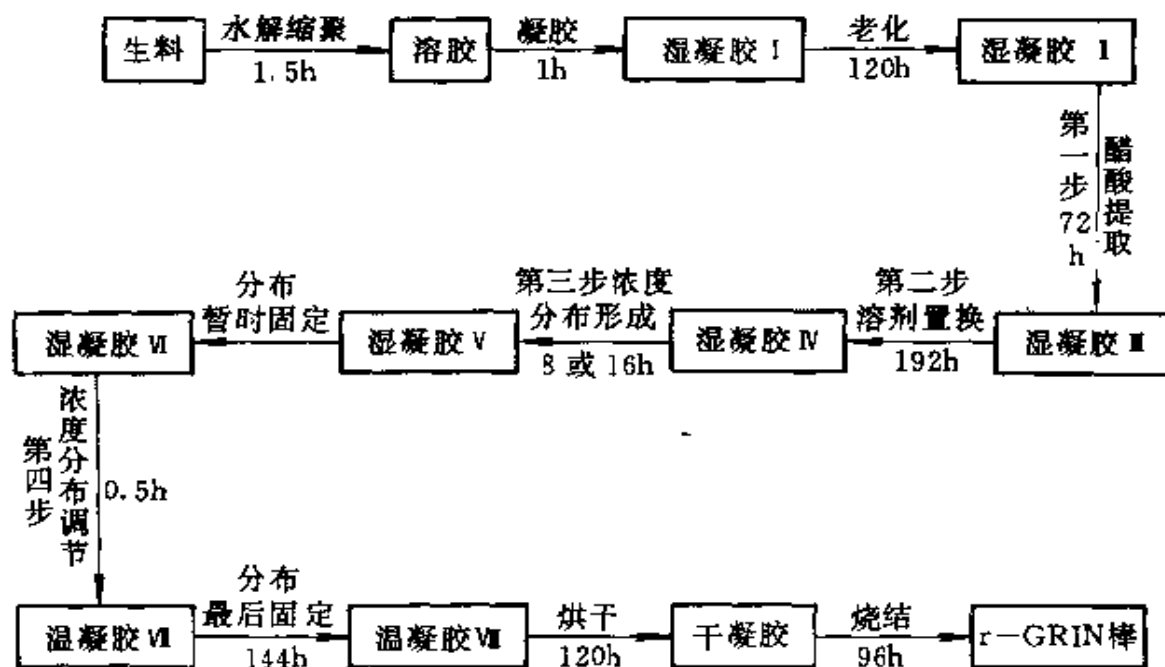
应该和凝胶微孔中溶液的醋酸铅浓度相同), 去除醋酸, 以防其产生的醋酸铅在表面出现析晶。第二步是浸在异丙醇-丙酮溶剂中, 用丙酮完全置换微孔中的液体, 并使醋酸铅微晶沉积在凝胶的微孔壁上, 这是控制折射率分布的最基本的一步。第三步是把这一湿凝胶浸在醋酸钾乙醇溶液中, 使凝胶微孔壁上醋酸铅微晶再溶解, 这样铅离子可与溶液中钾离子交换, 形成 GRIN。选用钾离子是因为 Pb 离子和 K 离子在液相的扩散系数比较接近, 钾离子置换凝胶中的铅离子还可补偿由于铅离子浓度降低而引起的热膨胀系数的减小。在折射率分布形成后提取乙醇过程中, 铅离子继续迁移, 使高折射率 2/3 直径段偏离抛物线分布。为使这种偏离最小, 增加了第四步。也就是把湿凝胶浸在丙酮中, 使折射率分布暂时固定, 然后再在醋酸钾乙醇溶液中浸 15~120min, 使表面附近的醋酸铅再溶解, 这样可以调节离子浓度的分布。最后是干燥和烧结、缩聚成型, 烧结温度在 505℃。全过程需 35 天。

第二种方法(醇盐凝胶法)与第一种方法(无机盐凝胶法)的主要区别是湿凝胶的合成和浸出液不同, 例如选用 TEOS 和钛酸丁酯  $[\text{Ti}(\text{OBU})_4]$  作金属醇盐。主要步骤有:

(1) 湿凝胶合成。将 TEOS 与溶剂混合, 加入少量 HCl 使其部分水解, 再加入其它添加剂如稀土盐, 硼酸, 铝、钠、钾的无机盐等, 剧烈搅拌下滴加钛酸丁酯。搅拌一段时间后加入水, 使所有盐类完全水解。将所得溶液倒入聚乙烯管状容器中, 待其胶凝。

(2) 凝胶老化。待反应液完全凝固后继续保持一天, 然后移入 60℃ 烘箱中。此时缩聚反应继续进行, 凝胶周围将析出一些液体, 其中包括溶剂、反应产物、醇类和水等。凝胶收缩与管壁脱离, 一般在 60℃ 条件下老化三天左右。

(3) 折射率调节离子的浸出和浓度梯度的固定。经老化析液后的凝胶从聚乙烯管中取出浸入酸液中, 浸渍液可选用硫酸、盐酸或硝酸。浸泡一段时间(一般为 24 小时), 溶出部分折射率调节离子钛, 然后将凝胶从酸浴中取出, 用水冲洗干净后浸入无水甲醇中以终止钛的迁移, 每天换一次新鲜甲醇。经甲醇处理可将湿凝胶孔中

图 5-23 无机盐凝胶法工艺流程<sup>[3, 24]</sup>

的残余浸渍液置换出,因甲醇分子小,表面张力小,在干燥时可减少凝胶的破裂。

(4)凝胶的干燥和烧结。湿凝胶从甲醇浴中取出后先置于室温下干燥,待其变得坚硬透明不再收缩后,转入 60℃烘箱中继续干燥,约七天左右,然后将干胶送入炉中烧结。升温程序因样品而异,一般先缓慢升温至 600℃~700℃,恒温一段时间,再迅速升温至 1000℃~1100℃。温度在 150℃~600℃之间时向炉内通入氧气,确保胶棒中的残余有机物完全烧尽。

### 5.6.3 现有样品的玻璃成分和特性

目前采用溶胶—凝胶法制作的 GRIN 玻璃棒,就成分而言,全都属硅酸盐玻璃,包括二元系、三元系和多组分硅酸盐玻璃。折射率调节离子主要采用 Ti、Cs、Rb、Pb、Ge、Ta、Zr、La 和 Y。北京

大学化学系黄瑞利等人采用醇盐凝胶法在  $\text{TiO}_2\text{—SiO}_2$  凝胶中掺入碱金属氧化物 ( $\text{Li}_2\text{O}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ), 以改变玻璃折射率, 并进行了初步尝试。表 5-9 列出了目前两种溶胶凝胶法玻璃体系及结果。表 5-10 给出部分样品的性能参数和玻璃体系。

表 5-9 溶胶—凝胶法 GRIN 玻璃研究概况

方法	浸出离子	浸入离子	玻璃体系	直径/mm	$\Delta n$
无机盐	Ti	H	$\text{Ti—SiO}_2$	10~13	
	Cs	$\text{NH}_4$	$\text{Cs—SiO}_2$		
	Rb	K	$\text{Rb—SiO}_2$		
	Pb	K	$\text{PbO}_2 + \text{B}_2\text{O}_3 + \text{SiO}_2$	6~13	0.02~0.05
醇盐	Ge	H	$\text{GeO—SiO}_2$	2~3.4	0.015~0.025
	Ti		$\text{TiO—SiO}_2$		
	Ta		$\text{TaO—SiO}_2$		
	Zr	H	$^{\textcircled{1}}\text{MO—SiO}_2$	3~8	0.013~0.028
	Ti		$\text{MO—B}_2\text{O}_3\text{—SiO}_2$		
	Ge		$\text{MO—Al}_2\text{O}_3\text{—SiO}_2$		
	La	H	$^{\textcircled{2}}\text{RE}_2\text{O}_3\text{—SiO}_2$	4.4~6.5	0.015~0.025
	Y		$\text{RE}_2\text{O}_3\text{—TiO}_2\text{—SiO}_2$		
	$\text{RE}_2\text{O}_3\text{—B}_2\text{O}_3\text{—TiO}_2\text{—SiO}_2$				

①M 代表 Zr, Ti 或 Ge。  
②RE 代表 La 或 Y。

表 5-10 溶胶—凝胶法制备 GRIN 棒部分样品特性

样品	玻璃体系	直径/mm	$n_0$	$\Delta n$	方法	注
Ti/Si-2	$\text{TiO}_2 + \text{SiO}_2$	4.4		0.03	醇盐凝胶	由北京 大学化学 系阮慎康、 黄瑞利提 供
SRE-9	$\text{La}_2\text{O}_3 + \text{B}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2 + \text{SiO}_2$	4.8		0.015		
SRE-11		4.5		0.015		
SY-I-5	$\text{Y}_2\text{O}_3 + \text{B}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2 + \text{SiO}_2$	5.0		0.021		
SY-I-6		4.8		0.019		

(续)

样品	玻璃体系	直径 /mm	$n_0$	$\Delta n$	方法	注
No. 15—0	PbO+B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +SiO <sub>2</sub>	8.0	1.650	0.052	无机盐凝胶	引自参考文献 [3.34]
No. 16—0.5		9.3		0.055		
No. 16—1		11.9		0.058		

## 5.7 用共聚法制造高分子 GRIN 材料

### 5.7.1 高分子材料及其性能

高分子材料用作光学材料人们首先关心的是光学特性:透过率、折射率和色散(阿贝数)。目前可用的高分子材料的折射率覆盖了较宽的区间( $n_d=1.3\sim 1.7$ ),阿贝数也有较宽的变化范围(20~70)<sup>[5.35]</sup>。但高分子材料的透过率却不如玻璃材料,大部分材料可见区透过率在90%以上,但近红外和紫外区都很差。当 $\lambda \geq 1000\text{nm}$ 时,各种原子和原子团光谱吸收很强而且不规则,这为高分子材料的使用带来了局限性。

利用高分子材料生成 GRIN,人们尝试了多种不同方法,但从目前来看,有希望应用的主要还是几种共聚法,如扩散共聚法、悬浮共聚法和光共聚法。后者可用来拉制 GRIN 光纤。这些方法的优点是梯度折射率深度可以较大,如 GRIN 棒直径可达10mm;折射率差也较大,可达0.03左右;加之重量轻、柔性好、成本低、制作工艺简单,因而受到关注。但由于透过率较差,化学稳定性差,硬度和耐热性能也不理想,因此目前仍处在实验室研究阶段。

### 5.7.2 扩散共聚法

#### 一、扩散共聚基本原理

扩散共聚采用两种折射率不同的单体,相互扩散并同时共聚合反应来形成 GRIN。首先使折射率较高且有两个能聚合的双

键的单体  $M_1$  在圆管型模具中预聚成凝胶状棒体,再将其放入折射率较低的液相单体  $M_2$  中,在一定温度下使  $M_2$  逐渐向  $M_1$  预聚棒中扩散,同时伴随有棒内的共聚反应,从而形成棒内成分浓度的扩散分布。然后取出棒,经保温共聚过程,使棒内剩余的单体完全聚合,形成最后的梯度折射率棒。

对扩散共聚法形成的 GRIN 棒的折射率和阿贝数也可事先进行设计计算。单体折射率常常采用洛伦茨-洛伦兹(Lorentz-Lorenz)公式计算

$$\frac{n^2 - 1}{n^2 + 2} = R \frac{\rho}{W} = R/V \quad (5-70)$$

$$R = \frac{4}{3} \pi N_A \chi \quad (5-71)$$

对高分子材料  $R$  是指结构单元的折射度,  $W$  为分子量,  $\rho$  为密度,  $V = W/\rho$  是结构单元摩尔体积,  $N_A$  为阿佛加德罗常数,  $\chi$  为分子极化率。阿贝数可由下式计算

$$\nu_d = \frac{6n_d}{(n_d^2 + 2)(n_d + 1)} \cdot \frac{R_d}{R_F - R_C} \quad (5-72)$$

若所用单体  $M_1$  和  $M_2$  的折射率分别为  $n_1$  和  $n_2$ , 则共聚体的折射率  $n_P$  可由折射率的叠加性得到

$$\frac{n_P^2 - 1}{n_P^2 + 2} = V_1 \cdot \frac{n_1^2 - 1}{n_1^2 + 2} + (1 - V_1) \frac{n_2^2 - 1}{n_2^2 + 2} \quad (5-73)$$

式中  $V_1$  为  $M_1$  成分的体积百分比。共聚体的色散可用与阿贝数相似的参量来描述

$$\begin{aligned} \frac{(n_P)_F - (n_P)_C}{(n_P)_D} &= \left\{ \frac{(n_1)_F - (n_1)_C}{(n_1)_D} \left[ \frac{(n_1)_D}{(n_1)_D^2 + 2} \right]^2 \cdot V_1 + \right. \\ &\left. \frac{(n_2)_F - (n_2)_C}{(n_2)_D} \left[ \frac{(n_2)_D}{(n_2)_D^2 + 2} \right]^2 \cdot (1 - V_1) \right\} \cdot \\ &\left[ \frac{(n_P)_D}{(n_P)_D^2 + 2} \right]^{-2} \end{aligned} \quad (5-74)$$

对单体  $M_1$  浸在单体  $M_2$  溶液中发生的扩散过程,在忽略  $M_1$  体内均聚和共聚反应的影响时,可采用 5.2.3 中径向梯度的扩散



方程及其解来分析。

## 二、单体的选择

选择单体体系的总原则应为：(1)单体  $M_1$ 、 $M_2$  的折射率应满足  $n_1 > n_2$ ，折射率差的大小根据需要而定；(2) $M$  含有两个活性双键，如碳—碳双键；(3) $M_1$ 、 $M_2$  及其聚合物相溶性相近；(4) $M_1$  和  $M_2$  能发生共聚反应。表 5-11 列出了已见报导的几种共聚单体体系。

表 5-11 主要扩散共聚单体体系<sup>[5, 9, 5.35]</sup>

单体体系	$n_1$	$n_2$	$n_3$	棒直径/mm
DAIP—MMA	1.569	1.490		1~4.0
DAIP—MMA	1.561	1.490		≤4.0
DAP—MMA/3FMA	1.574	1.490	1.418	
CR—39—3FMA		1.415		≤4.0
CR—39—4FMA				1~10.0
CR—39—St VB, PHMA				≤10.0
TEGDMA/St— $\phi$ FMA TAC/BzA— $\phi$ FMA		1.558		3.6
BzA—AMA	1.558	1.520		0.5~1.1
BzMA—EDMA—3FMA	1.568	1.506	1.415	

表中，体系中文名如下。MMA：甲基丙烯酸甲酯；DAIP：间苯二甲酸二烯丙酯；DAP：邻苯二甲酸二烯丙酯；CR-39：二缩乙二醇二碳酸二烯丙酯； $\phi$ FMA：甲基丙烯酸含氟酯；3FMA：甲基丙烯酸三氟乙酯；4FMA：甲基丙烯酸四氟乙酯；St：苯乙烯；VB：苯甲酸乙烯酯；PHMA：甲基丙烯酸苯酯；TEGDMA：三缩乙二醇二(甲基丙烯酸酯)；TAC：三聚氰酸三烯丙酯；BzA：丙烯酸苯甲酯；AMA：甲基丙烯酸烯丙酯；BzMA：甲基丙烯酸苯甲酯；EDMA：二甲基丙烯酸乙二醇。

## 三、预聚棒的制作

把含有一定浓度的引发剂(如过氧化苯甲酰, BPO)的  $M_1$  单体溶液注入内壁光洁的管状模具中, 在一定温度下(如  $T_1=80^\circ\text{C}$ ) 聚合一段时间(如  $t_1=4.5$  小时), 形成凝胶状预聚体, 脱模后即得所需预聚棒。

#### 四、扩散共聚及保温共聚过程

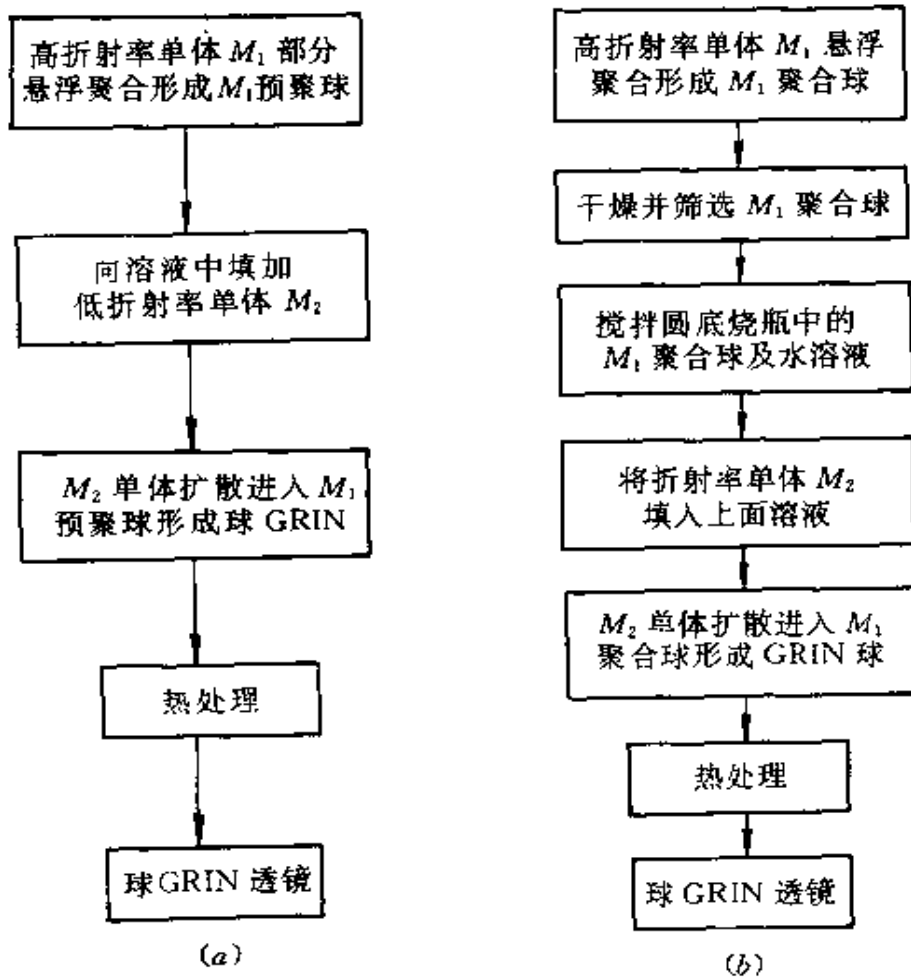
把含有一定浓度的 BPO 的  $M_2$  单体溶液注入扩散槽中, 再把预聚棒放入其中, 将扩散槽置于恒温水浴中, 在恒温(如  $T_2=50^\circ\text{C}\sim 80^\circ\text{C}$ ) 下进行扩散—共聚反应, 经一段时间(如  $t_2=2\sim 8$  分钟)取出棒体, 立即放入充氮气的保护瓶中, 在恒温(如  $T_3=80^\circ\text{C}$ ) 条件下保温共聚一段时间(如  $t_3=24$  小时), 使其完全聚合, 浓度分布固定下来, 从而得到梯度棒。

### 5.7.3 悬浮共聚法

悬浮共聚法是利用单体材料在溶液中表面张力作用下形成球体, 再进行扩散—共聚反应, 形成球 GRIN。图 5-24 给出了两种悬浮共聚法的流程图。

第一种方法首先使高折射率单体  $M_1$  (如 BzA + AMA) 倒入盛有  $60^\circ\text{C}\sim 70^\circ\text{C}$  的热水的圆底烧瓶中, 并以 250~350 转/分的速率搅拌, 再逐渐加入适量的稳定剂(聚乙烯醇 PVA), 单体即被分散并形成预聚球。然后再加入低折射率单体  $M_2$  (如 MMA)。  $M_2$  逐渐扩散进入  $M_1$ , 并与  $M_1$  发生共聚反应。直到这一悬浮共聚反应完全进行到底, 即得到 GRIN 球, 球直径在 0.5~1.1mm,  $\Delta n_{\max}\approx 0.028$ , 折射率沿径向呈线性变化。

第二种方法, 单体  $M_1$  在热水中完全聚合形成聚合球(而第一种方法中, 只是部分聚合形成预聚体), 然后经过滤筛选出相同直径(如  $2a=0.9\text{mm}$ ) 的聚合球, 再将其倒入盛有水溶液的圆底烧瓶中搅拌, 同时加入掺有引发剂的  $M_2$  溶液, 然后  $M_2$  单体扩散进入  $M_1$  单体形成球形折射率梯度。用这种方法形成的 GRIN 球具有抛物线分布,  $\Delta n_{\max}\approx 0.028$ 。在消除球差上, 它比第一种方法形成的线性分布的 GRIN 球更有效。

图 5-24 悬浮共聚法流程图<sup>[5, 9]</sup>

(a)方法 I; (b)方法 II。

## 参 考 文 献

- 5.1 Moore D T. Gradient index optics: aspects of design, testing and tolerancing. Ph D. thesis, university of Rochester, Rochester, New York, 1974
- 5.2 Caldwell J B, et al. Gradient index binocular Objective design. Applied Optics, 1986, 25:3345
- 5.3 Kindred D S, Moore D T. Design, fabrication and testing of a gradient index binocular objective. Applied Optics, 1988, 27(3):492~495
- 5.4 叶培大, 吴彝尊. 光波导技术基本理论. 北京: 人民邮电出版社, 1981. 227~231
- 5.5 McLaughlin P D, et al. Design of gradient index binocular objective, Proc. Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng., 1980, 237:369

5. 6 Leiner D C, Prescott R. Correction of chromatic aberrations in GRIN endscopes. *Applied Optics*, 1983, 22: 383
5. 7 *Selfoc Handbook*, NSG America Inc. , Clark, New Jersey, 1981 (Selfoc 是日本板玻璃(NSG)公司的注册商标)
5. 8 Koike Y, et al. Spherical gradient-index sphere lens. *Applied Optics*, 1986, 25 (19): 3356~3363
5. 9 Koike Y, et al. Spherical gradient-index polymer lens with low spherical aberration. *Applied Optics*, 1994, 33(16): 3394~3400
5. 10 Marinsky J A. *Ion Exchange*. New York: Marcel Dekker Inc. , 1969
5. 11 Houde-Walter S N and Moore D T. Delta-n control in GRIN glass by additives in AgCl diffusion baths. *Applied Optics*, 1986, 25(19): 3373~3378
5. 12 Stern K. The effect of anions on sodium determined glass membrane potentials. *J. Phys. Chem.* , 1970, 74: 1329
5. 13 Samuels J E, Moore D T. Gradient index profile control from mixed molten salt baths. *Applied Optics*, 1990, 29(28): 4042~4050
5. 14 Houde-Watter S N, Moore D T. Gradient index profile control by field-assisted ion exchange in glass. *Applied Optics*, 1985, 24(24): 4326~4333
5. 15 刘德森等. 纤维光学. 北京: 科学出版社, 1987. 196
5. 16 Fantone S D. Design, engineering and manufacturing aspects of gradient index optical components. Ph D thesis, University of Rochester, Rochester, New York, 1979
5. 17 Coutaz J L and Jaussaud P C. High index gradient in glass by ion exchange. *Applied Optics*, 1982, 21: 1063
5. 18 Kindred D S. Development of new gradient index glasses for Optical imaging systems. Ph D thesis, University of Rochester. Rochester, New York, 1990
5. 19 孙雨南, Kindred D S, Moore D T. 硼酸盐梯度折射率玻璃. *硅酸盐学报*, 1995, 22(5): 427~433
5. 20 Haggins M L, Sun K H, Davis D O. The dispersion of silicate glasses as a function of composition. I. *J. Opt. Soc. Am.* , 1942, 32: 635
5. 21 Ryan-Howard D P, Moore D T. Model for the chromatic properties of gradient-index glass. *Applied Optics*, 1985, 24(24): 4356~4366
5. 22 Ramaswamy R V, Srivastava R. Ion exchanged glass waveguides: a review. *Journal of Lightwave Technology*, 1988, 6(6): 984~1001
5. 23 Frischat G H. *Ion Diffusion in Oxide Glass*. Bay Village, OH: Trans. Tech. Publications, 1975: 84
5. 24 Araujo R. Colorless glasses containing ion-exchanged silver. *Applied Optics*,

- 1992, 31(25):5221~5224
5. 25 孙雨南,崔芳,熊剑. 银离子交换过程中着色问题的实验研究. 光子学报,1995, 24(Z1):272~276
5. 26 Bloom H. The Chemistry of Molten Salts. New York; W A Benjamin Inc. ,1967, 35
5. 27 Haun N, Kindred D S, Moore D T. Index profile control using  $\text{Li}^+$  for  $\text{Na}^+$  exchange in alumina-silicate glass. Applied Optics, 1990, 29(28):4056~4060
5. 28 Kindred D S, Bentley J, Moore D T. Axial and radial gradient-index titania flint glasses. Applied Optics, 1990, 29(28):4036~4040
5. 29 高应俊,刘德森,覃亚丽. 离子交换法平面微透镜的折射率分布和扩散系数的测求. 光电子器件与集成技术年会'91,北京,1991,408~413
5. 30 Zhu X, Sugiyama H, Iga K. Index profile simulation for a planar microlens by electromigration. Applied Optics, 1989, 28(20),4429~4431
5. 31 孙雨南,刘进等. 离子交换制作微透镜阵列交换电场的研究. 北京理工大学学报,1996,16(4):418~423
5. 32 张承忠. 金属的腐蚀与保护. 北京:冶金出版社,1985. 155
5. 33 刘德森等. 大数值孔径自聚焦平面微透镜列阵研究中的几个问题. 光电子器件与集成技术年会'91,北京,1991,706~716
5. 34 Yamane M, Inami M. Variable refractive index systems by sol-gel process. J. Non-Cryst. Solids, 1992, 147&148:606~613
5. 35 葛炳恒. 高分子梯度折射率材料的研究. 博士学位论文. 北京:北京理工大学, 1991

## 第六章 光波导器件制作

### 6.1 光波导概述

随着信息技术的迅速发展,电磁波作为信息载体,其波长正向短波方向发展,已从微波发展到了光波。与微波在金属波导中的传输相似,光波也能被束缚在介质光波导中传输,不同的是这些介质光波导的横截面尺度与光波长同量级,即仅在微米量级上。它又可分成圆波导(即光纤)和平面波导两大类,后者又往往被称作集成光学光波导,或简称光波导。光波导的研究以导波光学为理论基础,光波导的制作技术则以薄膜技术和微电子技术为基础,采用薄膜技术和平面工艺来实现光学器件的平面化和集成化。

阶跃折射率平板波导大多是在衬底上沉积或生长一层大约1微米到几十微米的薄膜材料来制成。常用的沉积技术包括各种蒸发镀膜技术,各种溅射镀膜技术,以及化学汽相沉积技术。对半导体材料还常常采用液相外延和分子束外延技术来生成薄膜层。而渐变折射率(GI)波导的形成往往通过材料表面改性技术来实现,例如通过扩散、质子交换、离子交换、离子注入,以及减少半导体材料载流子浓度的方法(如质子轰击),使衬底材料表面几个到几十个微米深度内的折射率按一定规律作缓慢变化。制作通道波导则首先要生成所需波导图形并设法把它转移到待加工的波导基片上形成掩模。最常用的方法是由计算机控制电子束扫描曝光,直接把波导图形“写”在电子抗蚀剂薄膜上,制成掩模板,再通过光刻技术将波导图形转移到衬底表面上的光致抗蚀剂上形成掩模,然后再

去作表面改性处理,形成通道波导。对于电光声光等波导器件,在形成通道波导后还要制作电极,进行波导端面处理并实现波导端面与光纤的对接耦合,形成通道以后的这些工艺又称作“波导后工艺”。

由于采用平面技术,光波导器件可以实现集成化。目前主要有三种集成方式:单片集成、光电子集成和混合集成。像集成电路一样把多个不同波导器件做在同一衬底材料上,形成集成光路,或把多个同种器件做在同一衬底上形成阵列器件。通常把这种方式称作单片集成(MIOC)。可以在半导体衬底上制作各种激光管(LD)、发光二极管(LED)、光电二极管(PIN)、雪崩光电二极管(APD),以及光放大器、光开关等有源集成器件,亦可在 $\text{LiNbO}_3$ 等衬底上制作各种调制器、开关、分路器、偏振器、模变换器、波长滤波器等无源器件集成光路或它们的阵列。许多光波导器件与电子电路紧密结合,例如半导体激光器需通过调制把电信号转化为光信号,它与一个外调制电子电路紧密联系;再如光电探测器,它将光信号转化为电信号,后面需紧跟一个电子放大电路。为了减少连接、提高信噪比和响应速度,将光学回路和电子回路做在同一衬底上,称之为光电子集成(OEIC)。目前在光纤通信中已采用该技术制成光发射机、光中继器和光接收机等。当前制作光波导的三大类材料尽管在某些方面都有自己的优点,但还没有一种理想的材料能以单片集成方式使各种不同类型波导器件同时获得最佳性能。例如Si、GaAs、InP等半导体材料可以制作性能优良的探测器、光源以及电子器件,但它们的电光、声光特性却远不如 $\text{LiNbO}_3$ 材料。为了最大限度地发挥各种材料在相应功能器件中的优势,人们又提出了一种混合集成(HIOC)。例如用半导体材料制成光源,用Si制成探测器,用 $\text{LiNbO}_3$ 制成调制器、开关等各种光波导器件,再将它们结合成一个紧密的完整系统。尽管这种方式不如单片集成稳定可靠,对多元集成难度极大,但在近期至少为制作某些功能器件提供了简便易行的途径,集成光学频谱分析器就是实际应用的例子。

集成光学器件目前在光纤通信、光纤—集成光学传感技术,以及光计算和光信息处理方面已得到广泛应用。

本章主要介绍集成光学器件制作中的一些主要技术。

## 6.2 图形的生成与转移

### 6.2.1 电子束扫描制作光刻掩模板

尽管目前已发展了无掩模直接加工技术,如聚焦离子束刻蚀技术,但绝大部分光波导器件制作仍离不开掩模技术。与无掩模技术相比,掩模技术相对成熟,掩模板可多次重复使用,成本低。电子束扫描曝光系统是在电子显微镜基础上发展起来的一种先进的制版和光刻设备,其特点主要表现在:

(1)分辨率高。电子束的波长远小于光波长,可达 $0.01\sim 0.007\text{nm}$ ,因此它的衍射效应可以忽略。聚焦电子束斑的直径可以小到 $0.5\sim 0.01\mu\text{m}^{[6.1]}$ ,而且可以是圆形束斑,也可以是方形束斑或可变矩形束斑,根据不同需要选择不同形状束斑,从而提高扫描曝光效率。用电子束扫描曝光制版的最小线宽已达 $0.5\mu\text{m}$ ,用子直接“光刻”,在实验中可获得 $0.1\sim 0.2\mu\text{m}$ 的线条,有人已实现 $0.008\mu\text{m}$ 线条<sup>[6.2]</sup>。

(2)图形加工精度高。由于采用计算机辅助设计(CAD)系统对图形数据进行处理,可以精确实现图形定位、尺寸缩放和修改变换等,因此可以实现图形尺寸的高精度,同时也可实现大面积的精确扫描。电子束扫描动作由两部分组成,一部分是靠电子束偏转来完成,它只能扫描很小的范围(称扫描场),由于扫描方式不同,扫描场只能达到几百个微米或几个毫米。对于集成光学器件,芯片尺寸往往有几十毫米,整个芯片的大面积扫描则要靠工件台的移动。目前的电子束扫描系统中都配有激光干涉测长定位系统,它与计算机控制系统相结合可完成工件台的精确移动,实现扫描场的精确对位,使掩模板有很高的拼接精度和套刻精度。目前该设备的图形尺寸精度、图形拼接精度和图形套刻精度都已能达到 $0.1\mu\text{m}$ 。



(3)加工灵活性强。这一优点主要来自系统采用了高速计算机,图形生成和扫描控制都由计算机来完成。

对集成光学波导器件来说,现有的电子束扫描曝光系统也存在一些问题。为减小波导传输损耗,波导通道弯曲希望采用曲线形状,而不希望采用折角。现有 CAD 系统中最小图形单元都是方形,这对集成电路矩形或折线形轨迹是不成问题的,但对光波导弯曲段则带来一些麻烦,这就需要先把曲线用一段一段折线来近似,然后每段折线再用正方形像素去填充,如图 6-1 所示。这些近似会产生一定的图形畸变,特别是方形像元素会使图形边缘变得不平滑,这样必然会增大散射损耗。解决办法之一是尽量减小像元素的尺寸。系统中一个像元素大约可小到  $0.1\mu\text{m}\times 0.1\mu\text{m}$ 。再一种解决办法是设计波导图形时在允许条件下尽量增加曲线段的曲率半径,以减小像元素填充折线段时产生的台阶数。

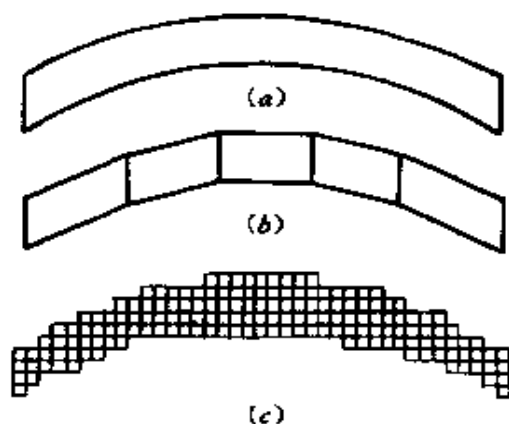


图 6-1 用折线和方形像元素近似曲线波导图形  
(a)原设计图形;(b)用折线近似曲线;(c)用像元素填充折线。

图 6-2 表示出电子束曝光制版的基本工艺流程,它实际上是把图形转移到铬金属膜上的过程。图 6-2(a)、(b)分别是采用负性电子抗蚀剂和正性电子抗蚀剂的情况。使用正性抗蚀剂时去胶和剥离是同时完成的,无需刻蚀,减少一个步骤,对于某些精细结构制作具有优越性。

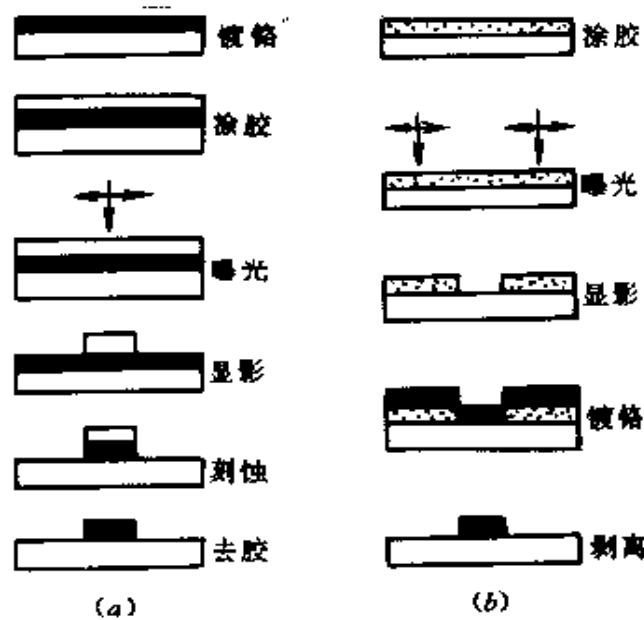


图 6-2 制版工艺流程

(a)使用负性胶制版工艺;(b)使用正性胶制版工艺。

### 6.2.2 光刻

光刻技术和光刻设备基本上完全采用集成电路制作工艺和设备,这里不再赘述。

### 6.2.3 光栅制作

光栅在集成光学器件中有着十分重要的作用,它作为波导输入、输出耦合器,波导分束器,反射器,滤波器等器件可单独使用,在分布反馈激光器中也是必不可少的部分。图 6-3 给出了集成光学中常见的几种光栅。其中图 6-3(a)为渐变折射率光栅;图 6-3(b)和图 6-3(c)为阶跃折射率浮雕型光栅。光栅可直接做在波导层中(如图 6-3(b)),也可作在波导层上面成为加载型。另外还有一种周期按某种规律变化的光栅结构,称作变周期(Chirped)光栅。由于它同时具有分波长和聚光的功能<sup>[6.3]</sup>,近年来在集成光学器件和大容量光通信技术中显示了优越性。这些光栅的横截面可以是矩形的,也可以是锯齿形或正弦型的。不同截面、不同深度和不同光

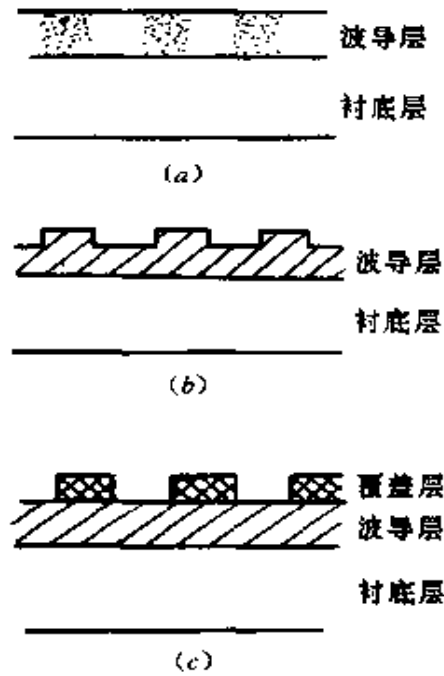


图 6-3 集成光学中几种常见光栅

(a)渐变折射率光栅；(b)波导层浮雕光栅；(c)波导加载浮雕光栅。

栅密度对光栅性能有很大影响。

渐变折射率光栅可以通过掩模、扩散、质子交换或离子交换技术制作。浮雕光栅可以通过掩模、刻蚀技术制作。加载浮雕光栅，若用抗蚀剂形成光栅则可直接写入光栅图形。但无论用哪种方法都必须首先将光栅图形写入抗蚀剂薄膜，或直接作为加载光栅，或作为下一步工序的掩模。制版—光刻这种两步技术成本低，使用方便，可以制作周期较大的光栅，但由于非相干的紫外光源在光刻中的衍射效应，限制了它的分辨率。光栅周期往往要达到亚微米量级，因此必须采用一步技术直接写入光栅图形。采用电子束扫描曝光可在电子抗蚀剂上得到质量很好的光栅图形，这在实验中已有应用。但电子束扫描曝光成本太高，速度也慢，因而很多时候采用激光全息技术写入光栅图形。

通常采用双光束干涉法拍摄光栅。由波动光学理论可知，产生的光栅周期为<sup>[6.4]</sup>

$$\Lambda = \lambda/n(\sin\theta_1 + \sin\theta_2) \quad (6-1)$$

式中  $\lambda$  为激光波长,  $n$  为抗蚀剂表面处介质折射率,  $\theta_1$  和  $\theta_2$  为两束光到抗蚀剂表面的入射角。光致抗蚀剂感光灵敏区大多在紫外区, 因而常使用 Ar 离子 ( $\lambda=488\text{nm}$ ) 或 He—Cd ( $\lambda=325\text{nm}$  或  $\lambda=422\text{nm}$ ) 激光器作光源。

由式(6-1)可以看出, 用双光束法得到的光栅, 其光栅周期由激光波长、入射角和周围介质折射率决定, 当  $\theta_1=\theta_2=90^\circ$  时, 可得理论最小光栅周期

$$\Lambda_{\min} = \lambda/2n \quad (6-2)$$

在空气中, 用 He—Cd 激光器可得  $\Lambda_{\min}=162\text{nm}$  ( $\lambda=325\text{nm}$ )。但对某些集成光学器件, 要求的光栅周期更小, 采用图 6-4 所示棱镜曝光法很容易实现这一要求。其中棱镜多采用紫光透过率高的石英材料。如果在胶层表面涂上折射率在 1.5~1.6 的匹配液, 可使光栅周期减小到 100nm 左右。这种方法只需单一的入射激光束, 另一路相干光束是通过棱镜全反射得到的, 这就大大简化了实验光路。只需改变光束入射角即可得到所需光栅周期, 使操作简便易行。这种方法在制作集成光学光栅器件时特别受欢迎。

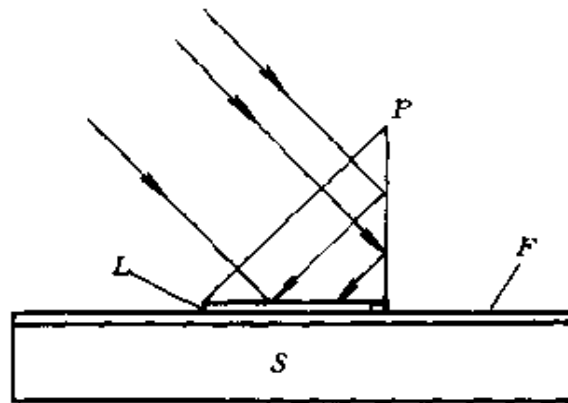


图 6-4 棱镜曝光系统示意图

L—匹配液; F—胶层; S—衬底; P—棱镜。

### 6.3 薄膜沉积技术

制作光波导器件时需要的薄膜, 包括介质薄膜、金属薄膜、半

导体薄膜,以及有机材料薄膜。介质薄膜和有机(如具有光学非线性的聚合物)薄膜,可作为光传输通道的波导膜,有些介质(如 $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  和  $\text{Si}_3\text{N}_4$ )薄膜可作为波导与电极之间的隔离层。金属薄膜(如 Al, Ag, Au)可用作电极,或作为扩散波导的离子源(如 Ag 或 Ti)。半导体薄膜可作为波导层或衬底层。制作波导所采用的薄膜的制备方法很多,如化学汽相沉积(CVD)、真空蒸发镀膜、各种溅射镀膜、离子镀膜,以及半导体材料的液相外延、分子束外延等都是经常采用的方法。

### 6.3.1 真空蒸发镀膜

真空蒸发镀膜是在  $1.33 \times 10^{-2} \text{Pa}$  以下的真空室内,直接或间接地加热被镀材料使其熔解再蒸发或直接由固体升华为气体,然后这些蒸发料的原子或分子沉积在基片上形成薄膜。真空蒸发镀膜技术可以镀制金属、合金、化合物或混合物,但用此技术制备的介质膜损耗大,在可见光波段可达  $10 \text{dB/cm}$ ,因此不易用作波导膜。它的沉积速度比较快,薄膜与基片间的附着力也不如溅射镀膜,膜厚控制难度较大。镀制对厚度要求不很精确的金属电极时往往采用它,但对膜厚有严格要求时,如制备扩散用 Ti 膜,则常不采用这种方法。

### 6.3.2 离子镀膜

近年来在真空蒸发镀膜技术上又发展了离子镀膜技术。它的特点是利用直流电场或射频电场在真空室中产生辉光放电区,当蒸发料粒子通过辉光放电区时,部分粒子被电离,因而加速奔向作为阴极的衬底基片。由于粒子能量增大,薄膜与基片之间的附着力也得到改善,同时保持蒸发镀的高效率。利用射频电场 ( $13.56 \text{MHz}$ ) 不仅可使放电状态稳定,而且能引起电子增殖作用,即使在  $1.33 \times 10^{-2} \text{Pa}$  量级的较低气压下也能维持充分放电。气压低,粒子平均自由程长,碰撞几率小,可以提高镀膜质量和效率。如在蒸发源处电子束和射频线圈并用,那么即使完全不引入气体,蒸

发粒子也能充分电离,从而可实现更高真空度的离子镀。如果在真空度较高的离子镀膜中引进惰性气体如氩(Ar)气,那么惰性气体及其离子对放电的稳定性、衬底的净化和温升以及复杂形态衬底上膜厚度的均匀性等都将有良好的效果。如果用氧、氮、乙炔等气体代替惰性气体实现放电,那么蒸发粒子可与离子发生化学反应而形成化合物薄膜,称之为反应离子镀。如利用上述三种气体可形成  $\text{In}_2\text{O}_3$ 、 $\text{ZnO}$ 、 $\text{TiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{TiC}$ 、 $\text{TiN}$ 、 $\text{TaN}$  以及  $\text{Si}-\text{N}$  系薄膜。

### 6.3.3 离子溅射镀膜

离子溅射镀膜是使真空室中惰性气体(如 Ar)电离,在电场作用下电离后的离子加速向阴极靶运动,并轰击靶材使其原子或分子溅射出靶材表面,然后这些被溅射出来的原子或分子带着从靶材中逸出的能量淀积在基片(阳极)上形成薄膜。离子溅射镀膜可以在较低气压下工作,由于被溅射粒子带有较大能量,因而膜层附着力强、致密、均匀。

产生离子的方法有多种,相应的溅射镀膜装置亦有多种。常见的有直流二极溅射装置,三极等离子溅射装置,射频溅射装置,磁控放电溅射装置,以及离子束溅射装置。其中后三种优点明显,采用较多。

国产 LKJ-2A 机是一种双离子束溅射镀膜机,它采用考夫曼型离子源,用 Ar 作为工作物质,气压为  $2.66 \times 10^{-2} \text{Pa}$ ,在电场作用下 Ar 被电离成  $\text{Ar}^+$ ,通过由三个电极片组成并相互对准的多孔栅极而被加速并“聚焦”,形成大面积平行束流而引出。LKJ-1C 型机离子源与国外同类 SERT-I 型机的束流密度均匀性更好<sup>[6.5]</sup>。机内设有两个离子源,如图 6-5 所示。其中  $S_1$  为主源,用于溅射沉积薄膜, $S_2$  为辅源,在沉积前先用它清洗基片表面,可进一步提高膜层附着力。采用 LKJ-2A 机双离子束溅射镀膜,获得了附着性、致密性、均匀性等性能良好的介质与金属薄膜<sup>[6.6]</sup>。

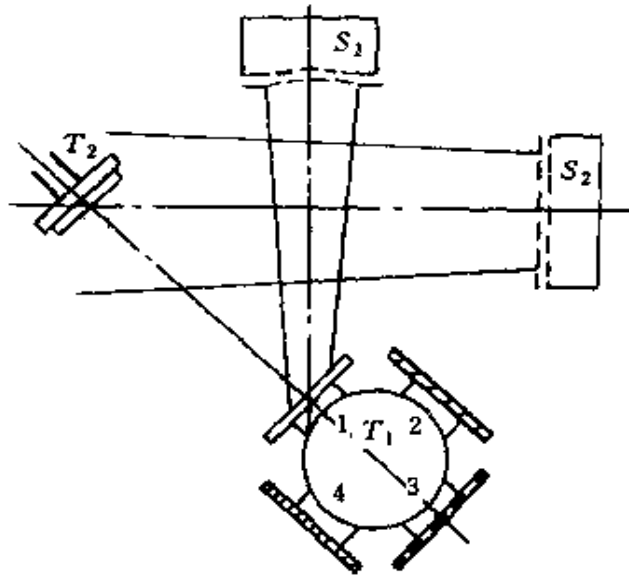


图 6-5 双离子束机示意图

$S_1$ —主离子源;  $S_2$ —辅助离子源;  $T_1$ —靶;  $T_2$ —工件。

## 6.4 刻蚀技术

波导或电极图形转移到基片表面的光致抗蚀剂上以后,再转移到基片上或基片上的金属膜层或介质膜层上时需采用刻蚀技术。刻蚀技术可分为两大类,一类是湿法刻蚀,光波导技术中主要是化学腐蚀;另一类是干法刻蚀,包括等离子刻蚀、离子溅射刻蚀、离子束溅射刻蚀,以及反应离子刻蚀和反应离子束刻蚀等。

### 6.4.1 湿法化学刻蚀

化学刻蚀是通过化学刻蚀液和被刻蚀物质之间的化学反应去除被刻蚀物质的,它可用于刻蚀金属、玻璃、半导体,以及它们的基片上的各种金属膜或介质膜。刻蚀不同材料需选择不同的化学刻蚀液,既要考虑到这种化学刻蚀液能有效腐蚀被刻蚀材料,又要考虑到它不能损伤基片材料的性能及表面图形掩模材料。化学刻蚀大多数情况下是各向同性刻蚀,但对某些晶体在不同晶向上可以

产生各向异性刻蚀。化学刻蚀的最大缺点就是在纵向刻蚀的同时会产生侧向钻蚀,而使图形线宽不易控制,且最小线宽受到限制。它的优点则是无需任何设备,简便易行,成本低。

利用湿法化学刻蚀在硅片上制作 V 形槽,可用于光纤与波导端面的对接耦合。通过光刻—掩模—化学刻蚀可在硅片上形成与基片上波导间隔完全相同的槽,各向异性刻蚀则能形成 V 形或梯形槽,这样可便于光纤的固定,因此可用它来有效实现光纤与多波导的端面耦合。

制作 V 形槽的工艺流程如图 6-6 所示。

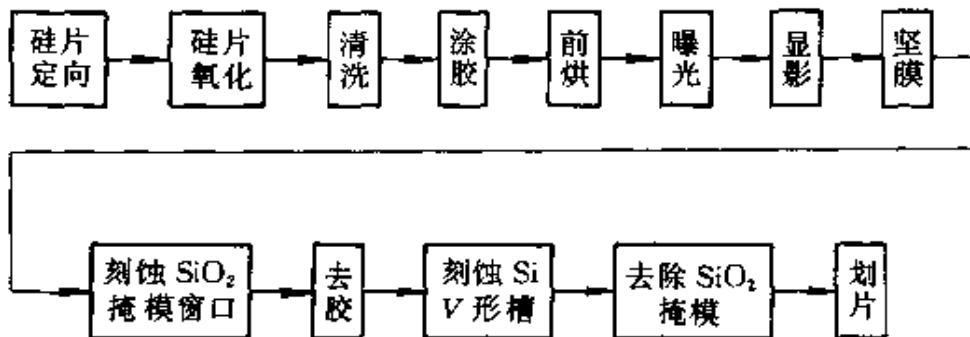


图 6-6 在硅片上制作 V 形槽的工艺流程

**硅片定向** 硅各向异性腐蚀是以硅晶体的各向异性为基础的,各晶面上原子排列密度和有效价键的不同,使各晶面的腐蚀速率也不同。硅单晶是金刚石结构,其(111)晶面原子排列密度最高,腐蚀速率最低。而(110)和(100)晶面的腐蚀速率依次要高得多。选取[100]单晶硅片,即抛光的表面为(100)晶面。为获取长而直的 V 形槽必须使掩模窗口图形的长边平行或垂直[110]晶向。由于〈100〉晶向腐蚀速率  $R_{\langle 100 \rangle}$  远大于〈111〉晶向腐蚀速率  $R_{\langle 111 \rangle}$ ,腐蚀开始后就会出现以(100)晶面为底,(111)晶面为斜边的对称等腰梯形截面的槽形。腐蚀时间足够长以后(100)面消失,两个(111)面相交,腐蚀自动停止,构成 V 形槽,如图 6-7 所示。因此必须首先确定硅片上〈110〉晶向,并沿此晶向划片,解理后可得平直边缘。这样可以为后续光刻工序提供对准的标准方向。



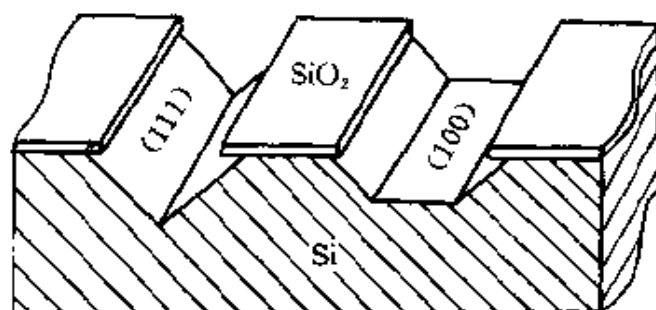
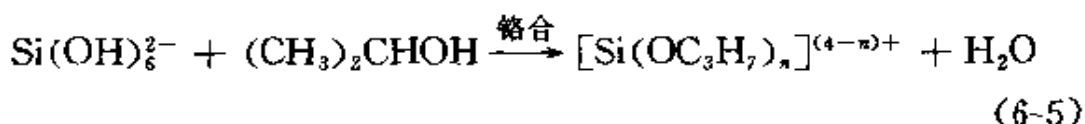
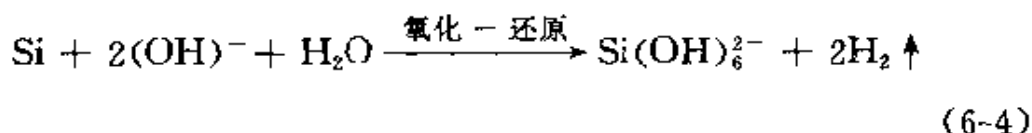
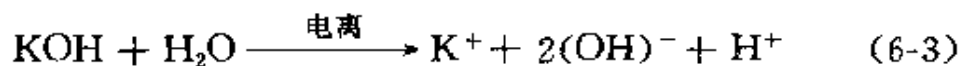


图 6-7 槽形示意图

**硅片氧化** 采用半导体工艺中常规(指常压、高压或等离子体)热氧化技术使硅片表面生成大约 400nm 厚的  $\text{SiO}_2$  膜层,用作腐蚀 Si 时的掩模层。

**刻蚀  $\text{SiO}_2$  掩模窗口**  $\text{SiO}_2$  窗口可用干法刻蚀亦可用湿法刻蚀。由于 V 形槽尺寸较大(一般宽度在  $100\mu\text{m}$  左右),精度要求不高,所以完全可以用化学刻蚀。 $\text{SiO}_2$  刻蚀液的配制为:氢氟酸(HF)+氟化铵( $\text{NH}_4\text{F}$ )+去离子水( $\text{H}_2\text{O}$ ),其中 HF 起刻蚀作用, $\text{NH}_4\text{F}$  起缓冲作用,可降低 HF 活性,便于控制反应,防止胶膜脱落和钻蚀。刻蚀在塑料烧杯  $40^\circ\text{C}$  水浴下进行。

**刻蚀 Si 片 V 形槽** 实验表明,采用氢氧化钾(KOH)+异丙醇 $[(\text{CH}_3)_2\text{CHOH}]$ +水( $\text{H}_2\text{O}$ )配制成各向异性腐蚀液,对硅片刻蚀能获得很好的效果。其中氢氧化钾是氧化剂,把 Si 氧化成含水的硅化物;异丙醇是络合剂,与含水的硅化物反应形成络合物离子,不断脱离反应界面;水是催化剂,不断为反应提供  $(\text{OH})^-$  离子。具体反应如下:



其中  $n=1,2,3,\dots,6$  为配位数。采用这种腐蚀液,  $80^{\circ}\text{C}$  下各晶面的腐蚀速率分别为  $R\langle 100\rangle\approx 750\text{nm}/\text{min}$ ,  $R\langle 111\rangle<90\text{nm}/\text{min}$ , 而  $\text{KOH}$  对  $\text{SiO}_2$  的腐蚀速率约为  $R_{\text{SiO}_2}\approx 2.8\text{nm}/\text{min}$ , 远小于  $R\langle 100\rangle$  和  $R\langle 111\rangle$ 。适当减少  $\text{KOH}$  和  $\text{H}_2\text{O}$  在腐蚀液中的比例可降低反应速度。因此只需控制腐蚀时间即可得到所需槽形(深度和宽度)。

刻蚀中应注意:(1)仍可采用水浴以保证刻蚀温度  $80^{\circ}\text{C}\pm 5^{\circ}\text{C}$ , 尽量保持容器中腐蚀液的温度稳定均匀;(2)硅片在容器中应竖放,且使槽口竖直向下,有利于  $\text{Si}$  的络合物脱离硅片表面,减少在槽内的残留;(3)容器口应尽量密封,并能冷却回流,以避免异丙醇和水的蒸发而改变腐蚀液浓度;(4)在达到预定的刻蚀时间之前需用超声清洗  $5\sim 10\text{min}$  以去除槽内残留物,避免残留物影响侧壁腐蚀,侧壁上的微小凸起将直接影响光纤定位精度。

#### 6.4.2 离子束溅射刻蚀

离子束溅射刻蚀,简称离子束刻蚀,也称离子铣。它靠纯粹的物理溅射过程去除被刻蚀的材料。入射离子具有很强的方向性,无钻蚀,能达到很高的分辨率,例如现已刻出  $8\text{nm}$  宽的金( $\text{Au}$ )特征图形。用这种方法能刻蚀任何材料或三层材料的组合,刻蚀剖面也可控制。同时,在真空中进行加工可避免污染和其它损伤。加工时引起的温度升高可通过水冷降到合理范围。因而这是一种比较理想的刻蚀手段。

##### 一、刻蚀速率

1976年斯茂克(Smockh)建立了纯物理溅射刻蚀的模型并导出了刻蚀速率公式<sup>[6.5]</sup>

$$ER = 9.6 \times 10^{24} J_b Y(E, \theta) \cos \theta / n \quad (\text{nm}/\text{min}) \quad (6-6)$$

式中  $n$  为材料的原子密度,单位为个/ $\text{cm}^3$ ;  $J_b$  是离子束流密度,单位取  $\text{mA}/\text{cm}^2$ ;  $Y(E, \theta)$  为溅射率,它定义为一个入射离子所能溅射出的原子个数;  $\theta$  为离子束入射角。刻蚀速率  $ER$  与材料有关。表6-1给出部分材料在不同离子入射能量和束流密度条件下的刻蚀速率。

表 6-1 部分材料的刻蚀速率值(垂直入射)<sup>[6.5]</sup>

$E_e V/J_b /$ (mA/cm <sup>2</sup> )		$ER /$ (nm/min)					
		400/0.5	500/0.5	500/0.6	600/0.6	650/0.7	750/0.8
材 料							
银	Ag	61.6	70.0	84.0	92.4	112.7	138.8
铝	Al	22.8	26.0	31.0	34.3	41.8	51.5
氧化铝	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.4	5.0	6.0	6.6	8.0	9.9
金	Au	61.6	70.0	84.0	92.4	112.7	138.8
铬	Cr	23.3	26.5	31.8	34.9	42.6	52.5
铜	Cu	36.0	41.0	49.0	54.1	66.0	81.3
铁	Fe	16.7	19.0	22.8	25.0	30.5	37.6
砷化镓	GaAs	66.0	75.0	90.0	99.0	120.7	148.8
铌酸锂	LiNbO <sub>3</sub>	17.6	20.0	24.0	26.4	32.2	39.6
铂	Pt	34.3	39.0	46.8	51.4	62.7	77.3
硅	Si	16.2	18.5	22.2	24.4	29.7	36.9
二氧化硅	SiO <sub>2</sub>	17.6	20.0	24.0	26.4	32.2	39.6
氮化硅	Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	16.7	19.0	22.8	25.0	30.5	37.6
钛	Ti	14.0	16.0	19.7	21.1	25.7	31.7
光刻胶	AZ1350J	13.2	15.0	18.0	19.8	24.1	29.7
玻璃(Na, Ca)		8.8	10.0	12.0	13.2	16.1	19.8
不锈钢 304		11.0	12.5	15.0	16.5	24.1	24.8

## 二、刻蚀速率与离子束入射角的关系

图 6-8 给出了九种不同材料的刻蚀速率与离子束入射角之间关系的实验曲线。 $ER$  值在  $0^\circ$  时并非最大。对每种材料都存在一个  $ER$  极大值, 它们对应了不同的离子束入射角  $\theta$ , 它们大致在  $30^\circ \sim 60^\circ$  之间(Au 除外)。有些材料如 GaAs 的  $ER$  值随  $\theta$  的变化很大, 而有些材料如 Ti, 变化就不大。人们关心刻蚀时的离子束入射角并不仅仅是为了寻求最大刻蚀速率, 而且还因为  $\theta$  角对控制刻蚀轮廓也起重要作用。

## 三、二次效应及图形轮廓

如果刻蚀沟槽的深宽比较大, 溅射粒子不能全部飞出槽外, 其

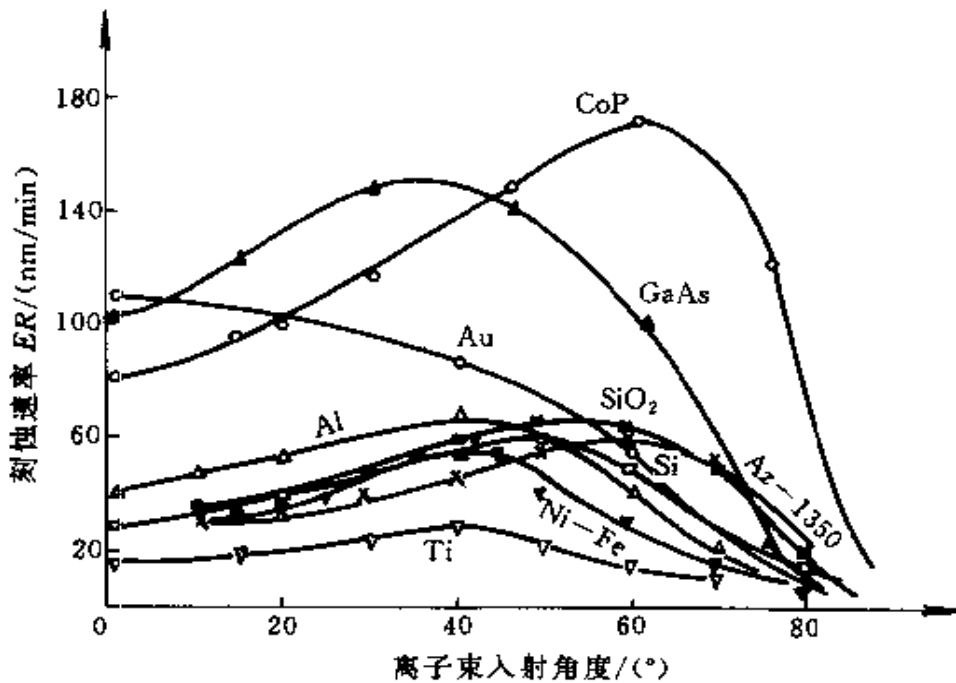


图 6-8 几种材料的  $ER$  与  $\theta$  关系的实验曲线<sup>[6,6]</sup>

实验条件:  $E=500\text{eV}$ ,  $J_b=1\text{mA/cm}^2$ 。

中一部分大角度溅射的粒子重新落到已刻出的槽壁上形成再沉积过程。另一方面,再沉积的材料还会再次受到离子的溅射形成再溅射。此外,刻蚀出的沟槽侧壁会向槽底反射离子,再沉积又会提高入射离子的反射率,这样射向槽底某一部位的反射离子与正常入射的束离子之和大于其它槽底的离子入射量,使该部位槽底刻蚀速率提高而形成局部小沟槽,这称为“开沟效应”。这种再沉积、再溅射和开沟效应都称之为二次效应,它们对刻蚀图形轮廓及分辨率都有直接影响。

开沟效应的直接后果是造成槽底刻面不平,这给刻蚀深度的控制造成困难。再沉积效应直观效果是造成侧壁倾斜和刻区变窄,使刻槽宽度变小而不能达到掩膜所限定的密度,还会影响到图形分辨率,最终限制了刻蚀沟槽深宽比能力。再溅射效应在一定程度上减轻了再沉积效应,再沉积和再溅射效应二者的平衡过程最终决定了刻槽侧壁的形状、宽度和深度。

刻蚀过程中还会出现侧向刻蚀效应。这是由于实际掩模图形不会是标准的矩形,边缘总会出现侧面倾斜。而刻蚀速率  $ER$  随离

子入射角  $\theta$  而变,这就使图形边缘的刻蚀速率不同,使刻蚀图形侧壁倾斜,称为侧向刻蚀效应。若采用  $ER$  值较小且随  $\theta$  变化不大的材料,如 Ti,则侧向刻蚀效应不大。侧向刻蚀效应小,有利于提高刻蚀分辨率。

掩模的膜厚和形状对刻蚀分辨率和图形轮廓都有直接影响,图 6-9 示出了几种典型情况。离子束垂直入射矩形掩模,将伴随较重的再沉积,两侧壁的堆积物形成毛刺。离子束垂直入射圆形掩模,将形成梯形轮廓。离子束垂直入射薄掩模会获得最好的刻蚀矩形轮廓。离子束斜入射不太厚的掩模并伴随样品旋转,也会获得矩形轮廓。坚膜( $150^{\circ}\text{C}\sim 180^{\circ}\text{C}$ ,超过正性光致抗蚀剂的软化点温度)或采用全息曝光都能产生圆形掩模。

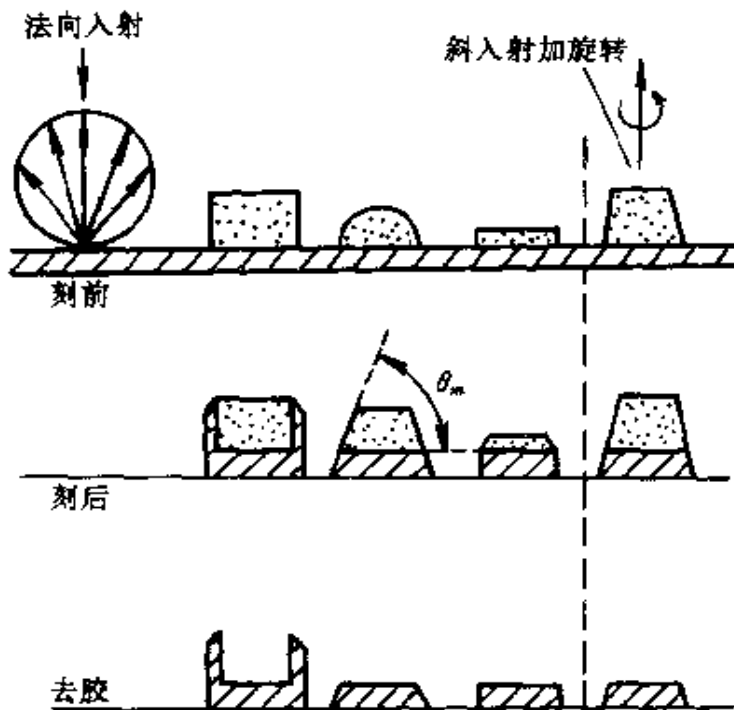


图 6-9 掩模形状及离子束入射角对刻蚀轮廓影响<sup>[6.5]</sup>

### 6.4.3 几种干法刻蚀技术比较

干法刻蚀技术的发展已有二十多年的历史,通常采用的方法也很多,表 6-2 中列出了一些主要的刻蚀方法并做了比较。

最早出现的干法刻蚀技术是等离子刻蚀,它是利用游离基具有远强于分子的化学活性这一特点实现刻蚀的。其中平板电极型结构目前还在采用,它在两平行电极间加入射频电场,片子放在接地电极上,在受到游离基的腐蚀反应的同时,有较多的离子轰击作用。它的机理主要是各向同性的气体游离基与固体的表面化学反应,刻蚀精度在微米量级。

70年代中期出现了反应离子刻蚀(RIE),采用了与平板电极等离子刻蚀相似的结构。它不仅保持等离子化学腐蚀作用,同时增强了物理溅射作用,从而提高了刻蚀速率,特别是加强了刻蚀的方向性,获得垂直的刻蚀剖面轮廓。以后出现了磁控反应离子刻蚀(MRIE)。在基片台背面加上磁极,在电场和磁场的共同作用下,辉光放电中产生的电子作螺旋运动,加长了电子的运动轨迹,增大了离化率,使刻蚀速率增大了几乎十倍。同时可以在较低射频功率下工作,降低了对基片的辐射损伤。RIE和MRIE可实现垂直的侧墙刻蚀,制作亚微米结构。

离子束刻蚀(IBE)或称离子铣(IM)的最大特点在于各种工艺参数的改变不会相互制约,便于调节。80年代在离子束刻蚀基础上发展了聚焦离子束(FIB)系统。通过离子聚焦系统获得离子细束(束斑直径 $\approx 0.8\mu\text{m}$ ),并用计算机控制偏转系统,对所设计图形扫描,从而实现无掩模刻蚀。FIB束能比宽束离子束(IB)一般高两个数量级。它的刻蚀机理仍属于纯物理溅射刻蚀。实验发现单次扫描只能刻蚀出近似V形的沟槽,多次重复扫描则能产生矩形截面沟槽,它的刻蚀效率很低、设备昂贵,只能在实验室中制备样品时使用。

70年代后期在离子束溅射刻蚀的基础上还发展了反应离子束刻蚀(RIBE)和化学辅助离子刻蚀(CAIBE),从而真正显示出离子束技术的优点。RIBE方法改用能与被刻蚀材料发生化学反应的某种气体或混合气体经电离后形成离子束,离子轰击和化学反应共同作用,形成刻蚀过程。常采用氟基或氯基气体,如 $\text{CF}_4$ 或 $\text{Cl}_2$ ,反应生成物多为气体,可被真空系统抽除。CAIBE仍采用惰

表 6-2 几种干法刻

刻蚀类型	等离子(PE)	反应离子(RIE)		离子束	
刻蚀方法	平板电极	反应离子 RIE	磁控反应离子 MRIE	离子铣 IBE	聚焦离子束 FIBE
作用机理	化学+物理	化学+物理	化学+物理	物理	物理
刻蚀剂	CF <sub>4</sub> , Cl <sub>2</sub> 等	CF <sub>4</sub> , Cl <sub>2</sub> 等	CF <sub>4</sub> +Cl <sub>2</sub> 等	Ar 等	Ar 等
工作气压/Pa	10 <sup>0</sup> ~10 <sup>2</sup>	10 <sup>1</sup> ~10 <sup>-1</sup>	10 <sup>0</sup> ~10 <sup>-2</sup>	10 <sup>-2</sup> ~10 <sup>-3</sup>	10 <sup>-2</sup> ~10 <sup>-3</sup>
离子能量/eV	10~500	50~700	50~700	200~2000	
反应粒子	中性, 低能	中性, 高能	中性, 高能	高能	高能
离子能量控制	半独立	半独立	半独立	独立	独立
离子流控制	半独立	半独立	半独立	独立	独立
中性粒子控制	半独立	半独立	半独立	/	/
选择性	良	中	中	差	差
刻蚀轮廓	主要各向同性	各向异性	各向异性	各向异性	各向异性
刻蚀轮廓控制	中	中高	中高	中	中
刻蚀线宽/ $\mu\text{m}$	1	0.05	0.1	0.1	/
刻蚀速率	大	大	大	小	小
图形掩模	有	有	有	有	无

## 蚀技术比较

(IBE)		电子回旋共振(ECR)		
反应离子束 RIBE	化学辅助离子束 CAIBE	离子束 IB	等离子体流 PS	分散 DECR
化学+物理	化学+物理	化学+物理	化学+物理	化学+物理
CF <sub>4</sub> , Cl <sub>2</sub> 等	Ar+CF <sub>4</sub> , Cl <sub>2</sub> 等	Ar+CF <sub>4</sub> , Cl <sub>2</sub> 等	Ar+CF <sub>4</sub> , Cl <sub>2</sub> 等	Ar+CF <sub>4</sub> , Cl <sub>2</sub> 等
10 <sup>-3</sup>	10 <sup>-2</sup> ~10 <sup>-3</sup>	10 <sup>-1</sup> ~10 <sup>-3</sup>	10 <sup>-1</sup> ~10 <sup>-3</sup>	10 <sup>-1</sup> ~10 <sup>-3</sup>
100~1500	30~1500	30~1500	50~700	50~700
中性, 高能	中性, 高能	中性, 高能	中性, 高能	中性, 高能
独立	独立	独立	独立	独立
独立	独立	独立	独立	独立
半独立	独立	半独立	半独立	半独立
中	中	中	中	中
主要各向异性	各向异性+同性	定向	各向异性	各向异性
中高	高	高	中	中
0.05	0.01	0.01	0.05	0.05
大	大	大	大	大
有	有	有	有	有



性气体生成离子束并轰击溅射待刻蚀材料,同时通入另一种能与被刻蚀材料反应的气体,这样仍有物理溅射和化学反应两种机理同时作用形成刻蚀。RIBE 和 CAIBE 的显著特点是能进一步独立调节物理和化学反应过程,更大限度地控制工艺参数,不仅成倍地提高了刻蚀速率,而且带来了优良的选择性,降低了刻蚀损伤。这种方法可制作纳米结构。

80 年代中期,利用微波电场和正交磁场产生的电子回旋共振(ECR)效应制作了无灯丝离子源,从而解决了离子源灯丝在反应性气氛中寿命有限,需频繁更换的极大难题。由于 ECR 的工作气压低,粒子的平均自由程很长,在刻蚀速率和刻蚀方向性方面大有改善,是刻蚀技术当前发展的最新技术。

## 6.5 表面改性技术

所谓“表面改性”主要是指改变衬底表面几个微米到十几个微米深度内离子或半导体的载流子浓度分布,从而改变折射率分布以形成波导层或波导通道。集成光学中最常用的表面改性技术有扩散、离子交换和迁移、质子交换、离子注入以及质子轰击消除半导体中的载流子。

### 6.5.1 扩散

扩散是半导体工艺中经常采用的方法。在集成光学中不仅可用于半导体波导的制作,而且经常用于制作  $\text{LiNbO}_3$  波导。

#### 一、钛扩散铌酸锂波导工艺及原理

Ti 扩散  $\text{LiNbO}_3$  波导的制作过程如图 6-10 所示。经甩胶、曝光、显影之后,所设计的波导图形保留在  $\text{LiNbO}_3$  表面的正性光刻胶上,然后在光刻胶上沉积一层金属钛(Ti)薄膜,再在丙酮溶液中去胶、剥离,留下所希望的 Ti 条,其宽度和厚度分别为  $w$  和  $\tau$ ,然后送入扩散炉中,扩散温度保持在  $\text{LiNbO}_3$  晶体的居里温度( $1125^\circ\text{C}$ )之下,通常在  $980^\circ\text{C} \sim 1050^\circ\text{C}$  之间,扩散  $4 \sim 10\text{h}$ 。还可采

用另外一种工艺流程,先在 $\text{LiNbO}_3$ 基片上沉积 Ti 膜,然后甩胶、曝光,显影后波导图形上方的光刻胶被保留(如采用负光致抗蚀剂),其它部分 Ti 膜暴露在外,经干法或湿法刻蚀,去掉不需要的钛膜而保留 Ti 条波导图形。因正光致抗蚀剂分辨率较高,工艺流程比较简单,因而较多采用前一种工艺。

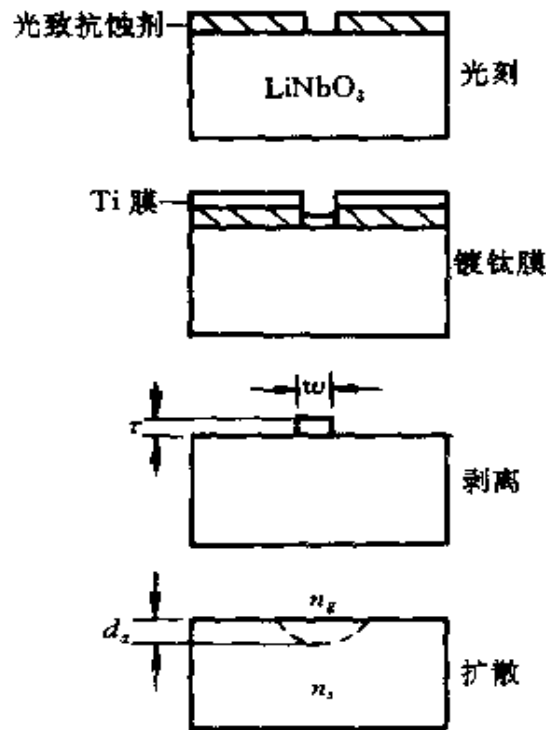


图 6-10  $\text{Ti}:\text{LiNbO}_3$  波导工艺流程

在扩散炉中,从  $500^\circ\text{C}$  开始 Ti 原子和周围氧原子形成  $\text{TiO}_2$ , 当上升到较高温度后,  $\text{TiO}_2$  与晶体中的 Nb 原子形成  $\text{Ti-Nb-O}$  化合物  $\text{Ti}_{0.55}\text{Nb}_{0.35}\text{O}_2$ 。在  $950^\circ\text{C}$  左右该化合物中的 Ti 离子逐渐扩散入衬底,取代了衬底中 Nb 离子位置,并在其内部形成  $\text{Li-Ti-O}$  化合物  $\text{Li}_2\text{Ti}_3\text{O}_7$  ( $\text{Li}_2\text{O}:\text{TiO}_2=1:3$ )。这种化合物在  $1000^\circ\text{C}\sim 1300^\circ\text{C}$  时,再与部分  $\text{Li}_2\text{TiO}_3$  ( $\text{Li}_2\text{O}+\text{TiO}_2$ ) 和  $\text{TiO}_2$  形成一种共晶混合物。由于 Ti 原子半径比 Nb 原子半径大,形成的共晶混合物体积增大,其光学性质表现为折射率增大。不同切向晶体, Ti 原子将沿不同晶轴方向扩散,且扩散系数也不同。

在 Ti 向  $\text{LiNbO}_3$  晶体内扩散的同时,晶体内的  $\text{Li}^+$  或  $\text{Li}_2\text{O}$  同

时也向表面外扩散,形成  $\text{Li}_2\text{O}_5$  薄膜层,它会使波导损耗增大,因此扩散时总要设法抑制  $\text{Li}_2\text{O}$  的外扩散。例如在盛  $\text{LiNbO}_3$  基片的石英舟中填充  $\text{Li}_2\text{CO}_3$  或  $\text{LiNbO}_3$  粉末,使整个扩散过程一直在  $\text{Li}_2\text{O}$  的气氛中进行。或在扩散时通入湿氩( $\text{Ar} + \text{H}_2\text{O}$ ),扩散后冷却时再通入湿氧( $\text{O}_2 + \text{H}_2\text{O}$ )。氧气的作用可以使晶体再氧化,用于补偿扩散中失去的氧。水蒸汽的作用最初是用来减小扩散带来的晶体光折效应,后来发现还有抑制  $\text{Li}_2\text{O}$  外扩散作用。有时这两种方法可同时使用。

## 二、折射率分布与浓度关系

Ti 金属向  $\text{LiNbO}_3$  晶体中内扩散过程的扩散方程可写为

$$D \nabla^2 c = \partial c / \partial t \quad (6-7)$$

其中  $c$  为晶体中掺杂离子( $\text{Ti}^+$ )的浓度, $D$  为掺杂离子的自扩散系数,它与扩散温度  $T$  的关系同样满足式(5-27)

$$D = D_0 \exp(-\theta/kT)$$

对于条形波导,当扩散时间大于全部金属 Ti 膜都扩散进入  $\text{LiNbO}_3$  所需时间时,扩散方程(6-7)的解可写成<sup>[6,7]</sup>

$$\Delta c(x, y) = \frac{1}{2} c_0 \exp(x^2/4D_x t) \left[ \operatorname{erf} \left( \frac{w/2 + y}{2 \sqrt{D_y t}} \right) + \operatorname{erf} \left( \frac{w/2 - y}{2 \sqrt{D_y t}} \right) \right] \quad (6-8)$$

其中  $c_c = \tau / \sqrt{\pi D_x t}$  (6-8a)

$\tau$  为 Ti 膜厚度, $t$  为扩散时间, $D_x, D_y$  分别为深度  $x$  方向和宽度  $y$  方向的自扩散系数,面纵向和横向扩散深度分别为

$$d_x = 2 \sqrt{D_x t} \quad (6-9a)$$

$$d_y = 2 \sqrt{D_y t} \quad (6-9b)$$

$\text{LiNbO}_3$  折射率随 Ti 的浓度增加而增大,但寻常折射率  $n_o$  和非寻常折射率  $n_e$  与 Ti 浓度的关系却略有不同。图 6-11 是  $\Delta n_o$  和  $\Delta n_e$  与 Ti 浓度  $c$  之间关系的实验测量曲线。可以看出  $\Delta n_e$  与  $c$  有较好的线性关系,而  $n_o$  在  $\Delta n$  较小时也基本上是线性的,只是不同

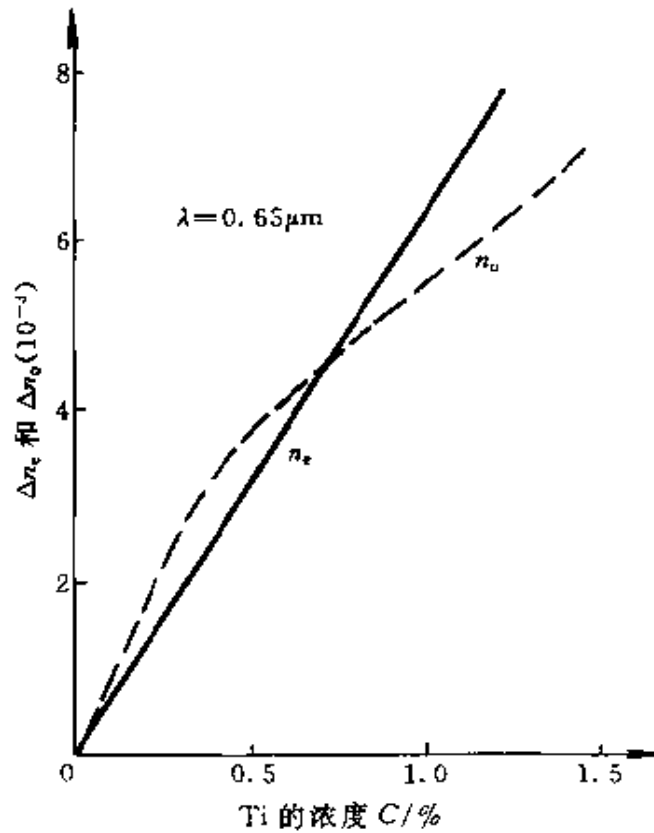


图 6-11  $\Delta n$  与 Ti 浓度  $c$  的实验测量曲线<sup>[6-8]</sup>

区间有不同斜率,当  $\Delta n$  较大时则趋于饱和。在折射率变化不大时,可把扩散后波导折射率分布写成

$$n(x, y, \lambda) = n_b(\lambda) + \Delta n(x, y, \lambda) \quad (6-10)$$

$$\Delta n(x, y, \lambda) = \frac{dn(\lambda)}{dc} \Delta c(x, y) = \Delta n_s(\lambda) f(x/d_x) g(2y/w) \quad (6-10a)$$

其中:

$$f(x/d_x) = \exp[-(x/d_x)^2] \quad (6-10b)$$

$$g(2y/w) = \frac{1}{2} \left[ \operatorname{erf} \left( \frac{w/2 + y}{d_y} \right) + \operatorname{erf} \left( \frac{w/2 - y}{d_y} \right) \right] \quad (6-10c)$$

$$\Delta n_s(\lambda) = \frac{dn(\lambda)}{dc} \cdot \frac{2\tau}{\sqrt{\pi} d_x} \quad (6-10d)$$

上式对  $n_o$  和  $n_e$  都成立,只是  $dn_o/dc$  和  $dn_e/dc$  不同,一般说来  $dn_o/dc \approx 0.33$ ,而  $dn_e/dc \approx 0.66$ <sup>[6.9]</sup>,而且随波长而变。

由式(6-10a)和式(6-10d)可以看出 Ti 膜厚度  $\tau$  直接决定了波导的最大折射率差  $\Delta n_s$ 。由式(6-9a)和式(6-9b)可以看出扩散时间长会增加扩散深度,加宽、加深波导截面,但同时会减小  $\Delta n_s$ ,并改变折射率分布曲线形状,这可由式(6-8)和式(6-8a)看出。图 6-12 示出三种不同扩散时间条件下波导折射率的分布。而提高扩散温度  $T$ ,会增大扩散系数  $D$ ,同样会增大扩散深度,减小折射率差。

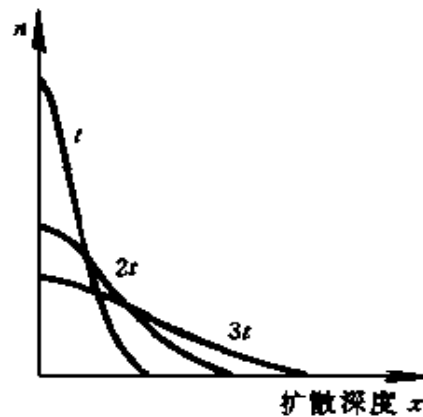


图 6-12 不同扩散时间对折射率分布影响<sup>[6.11]</sup>

### 三、模式控制与模斑控制

利用导模特征方程及导模截止方程,可以得出波导传输模式数目以及与波导参数之间的关系<sup>[6.10]</sup>。一般说来,波导传输的模式数或者说各阶导模的截止条件与波导的折射率差  $\Delta n$ 、波导条宽度和深(厚)度,以及传输光波波长有关。 $\Delta n$  越大、条宽越宽、条深越深、波长越短,传输的模式数越多。而波导器件中往往希望传输的模式数少,特别是希望单模传输。因此制造波导时希望通过控制扩散工艺参数来得到所需要的单模波导。采用有效折射率法处理三维渐变折射率波导,可解出不同模式的截止条件,并计算出不同基片在特定扩散温度、特定传输波长下基模和 1 阶模与 Ti 膜厚  $\tau$  和 Ti 条宽度  $W$  之间的关系<sup>[6.11]</sup>。图 6-13(a)、(b)、(c)、(d)为计算结

果曲线。从曲线中可以知道波导条在某宽度下需要多厚的钛膜才能实现所要求阶数的导模。其中膜厚  $\tau$  与 Ti 的密度有关。不同的沉积薄膜方法 Ti 的密度不同。采用电子束蒸发和溅射镀膜技术, 其密度与体金属密度大致相同; 采用热蒸发技术, Ti 膜的密度大约只有体密度的 70%<sup>[6.8]</sup>。

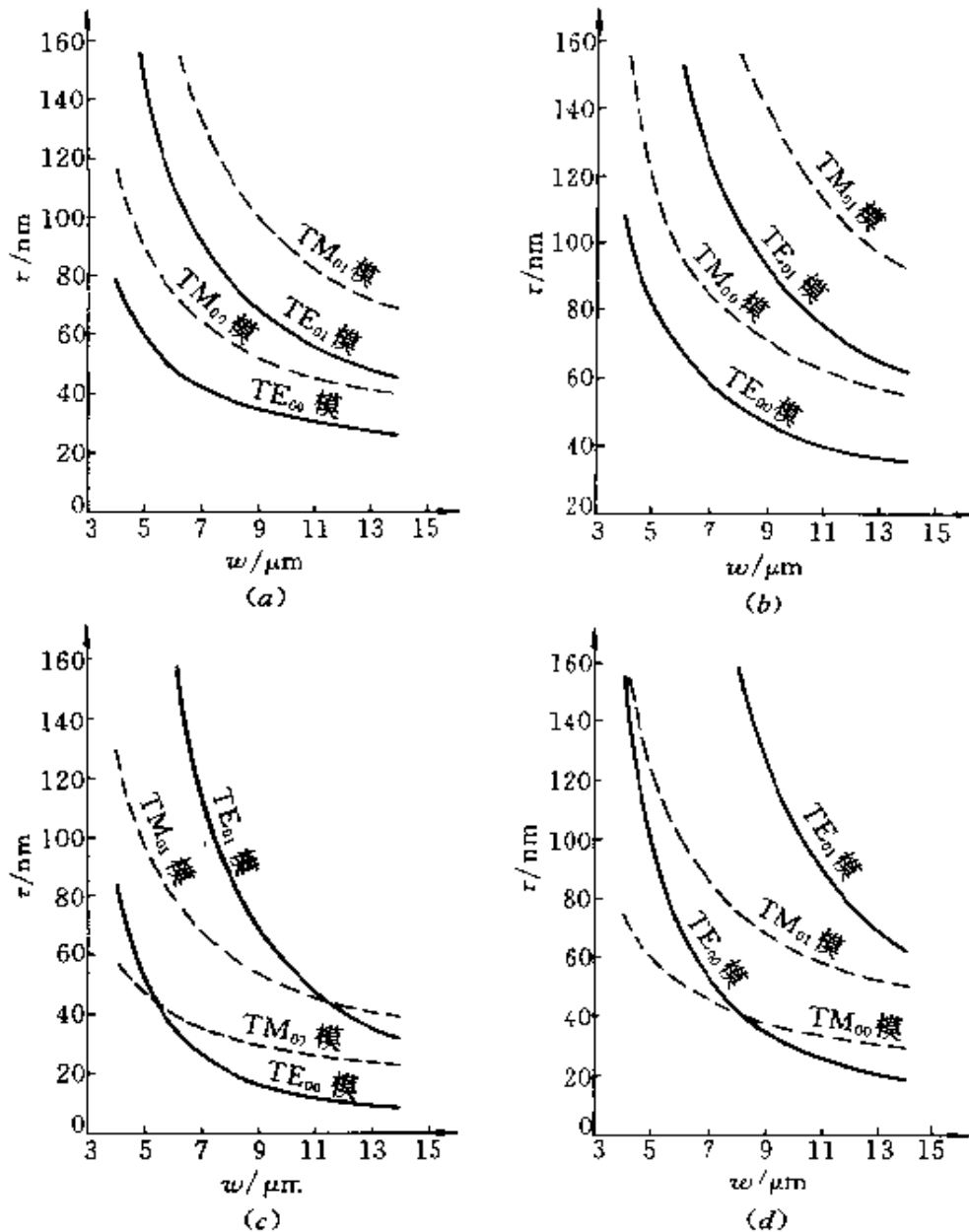


图 6-13 Ti:LiNbO<sub>3</sub> 波导截止条件<sup>[6.1]</sup>

(a)  $x$  轴切割, 沿  $y$  轴传输,  $\lambda=1.3\mu\text{m}$ ; (b)  $x$  轴切割, 沿  $y$  轴传输,  $\lambda=1.5\mu\text{m}$ ;  
 (c)  $z$  轴切割, 沿  $x$  轴传输,  $\lambda=1.3\mu\text{m}$ ; (d)  $z$  轴切割, 沿  $x$  轴传输,  $\lambda=1.52\mu\text{m}$ 。

在大多数应用中  $\text{LiNbO}_3$  波导与光纤之间采用端面直接耦合,为了提高耦合效率,不仅要提高光纤与波导端面之间的几何对准精度,减小菲涅耳反射,同时必须尽可能实现两者的模斑匹配。由于波导区与覆盖层(空气)和衬底之间的折射率差不同,波导模斑在深度方向上是不对称的,而光纤是圆对称的。图 6-14 是用红外近场仪拍下的光纤和波导输出 TM 模模斑的光强分布,波导样品扩散前 Ti 条宽度为  $9\mu\text{m}$ ,光纤为标准单模光纤。在宽度(波导表面)方向上,模斑基本上是高斯分布,与光纤的模斑匹配很好。但在深度方向上,分布曲线的大部分与厄米-高斯函数重合,在进入衬底两段上曲线下落比厄米-高斯函数要缓慢。为了获得尽可能好的模斑匹配,必须选择合适的扩散参数来控制扩散深度和  $\Delta n$ 。

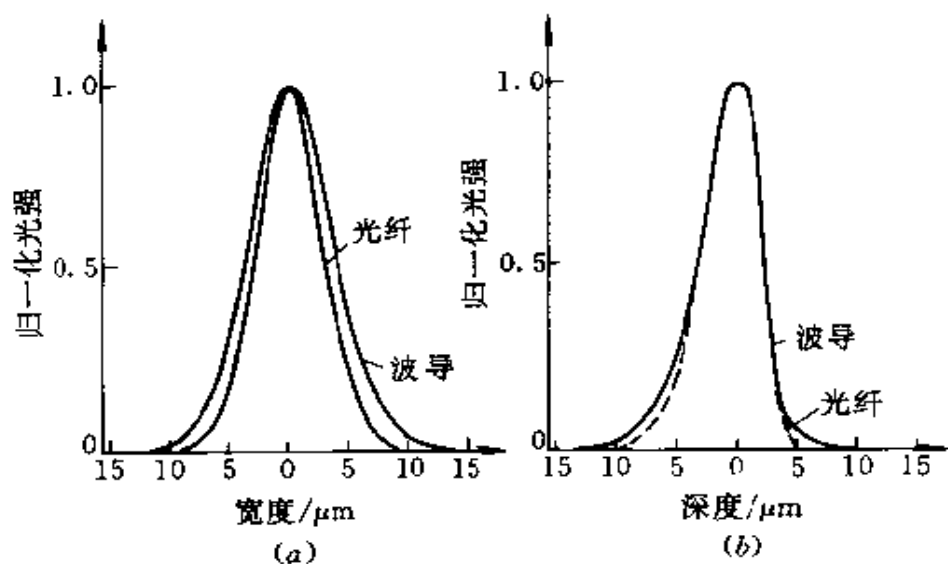


图 6-14 波导模斑光强分布测量曲线<sup>[6,8]</sup>

(a)宽度方向;(b)深度方向。

对波长为  $1.3\mu\text{m}$  或  $1.5\mu\text{m}$  的单模光纤,其芯径一般在  $8\sim 10\mu\text{m}$ ,因而希望扩散深度相对要大。扩散深度大也有利于减少表面散射引起的传输损耗。如前所述,选取合适的扩散时间  $t$  和扩散温度  $T$  来控制扩散深度。Ti 金属膜的厚度  $\tau$  决定了波导的折射率差  $\Delta n$ ,为使模斑匹配,应使  $\Delta n$  足够小,接近光纤的  $\Delta n$ 。因此必须

选择  $\tau$  足够小使在设定的扩散时间内和扩散温度下能全部扩散进入  $\text{LiNbO}_3$ ; 同时, 扩散后的  $\Delta n$  能足以产生有效的单模波导。为获取有效模斑匹配要选择的另一个扩散参数是 Ti 条宽度。图 6-15 所示为 TE 模模斑宽度在给定扩散参数条件下与 Ti 金属条宽之间的关系。 $w_x$  和  $w_y$  分别为深度和宽度方向上光强下降到  $1/e$  时的模斑深度和宽度。定义几何平均直径为  $w = \sqrt{w_x w_y}$ , 偏心率为  $\varepsilon = w_x/w_y$ 。TM 模模斑宽度与金属条宽的关系与图 6-15 相似。从图中可以看出, 条宽在  $6 \sim 10 \mu\text{m}$  时, 模斑宽度是相对稳定的, 它相应于很好的导模, 模斑偏心率大约为 1.5, 而金属 Ti 条宽减小, 接近模截止, 模斑迅速增大。对这样的扩散条件, Ti 条宽在  $7 \sim 10 \mu\text{m}$  时光纤与波导可以很好匹配。图 6-14 测量的样品与图 6-15 中所用的扩散条件相同, 扩散温度  $1100^\circ\text{C}$ , 扩散时间 6h, 钛膜厚度  $72\text{nm}$ 。

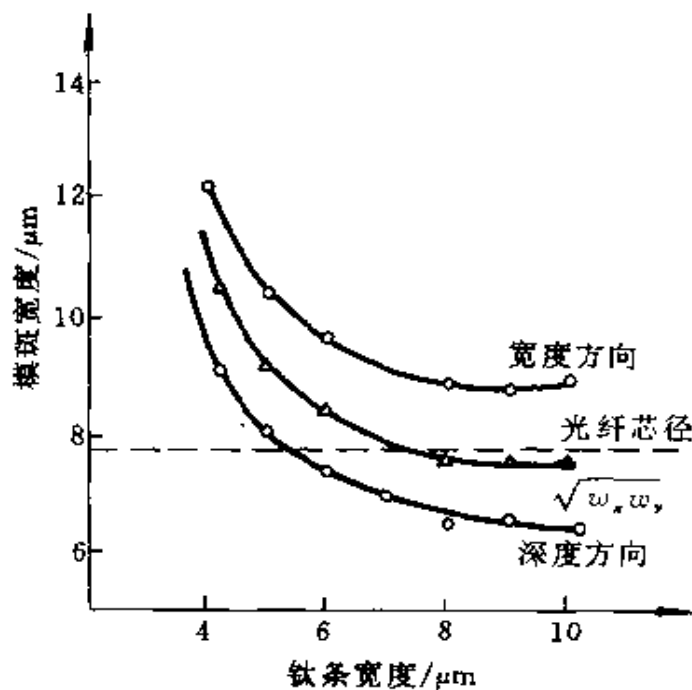


图 6-15 TE 模模斑宽度与 Ti 金属条宽之间关系的实验测量曲线<sup>[6.8]</sup>



### 6.5.2 质子交换

将  $\text{LiNbO}_3$  晶体浸入熔融的苯甲酸中,晶体表面有部分  $\text{Li}^+$  将被苯甲酸中的  $\text{H}^+$  (即质子) 所取代,然后向  $\text{LiNbO}_3$  晶体中扩散。 $\text{H}^+$  浓度的增加会使  $\text{LiNbO}_3$  折射率改变,从而形成波导。表面  $\text{Li}^+ - \text{H}^+$  交换过程可用下述平衡方程描述



苯甲酸在室温下为固态,其熔点为  $122^\circ\text{C}$ ,沸点为  $249^\circ\text{C}$ 。采用纯苯甲酸作为  $\text{H}^+$  源交换时,一般交换温度可介于  $200 \sim 249^\circ\text{C}$  之间。交换后  $\text{LiNbO}_3$  表面非寻常光折射率增大,形成近似阶跃折射率分布,折射率差  $\Delta n_e$  达 0.12,而寻常光折射率减小, $\Delta n_o = -0.04$ 。 $\text{H}^+$  在  $\text{LiNbO}_3$  中的扩散系数不仅与温度有关,而且与晶体中扩散方向有关。例如  $T = 235^\circ\text{C}$  时,沿晶体  $x$  和  $z$  方向的扩散系数分别为  $D_x \approx 1 \mu\text{m}^2/\text{h}$  和  $D_z = 0.4 \mu\text{m}^2/\text{h}$ 。这种方法制作的平面波导在可见光波段,波导损耗约在  $0.5 \text{dB}/\text{cm}^{[6.8]}$ 。

采用苯甲酸锂稀释苯甲酸作为质子交换源,可以减小表面折射率差  $\Delta n_e$ 。图 6-16 给出了苯甲酸中苯甲酸锂浓度对表面折射率

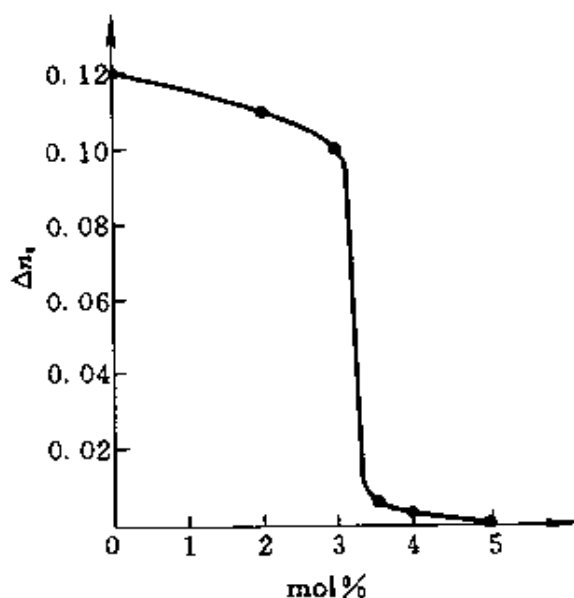


图 6-16  $\Delta n_e$  与苯甲酸锂浓度的关系<sup>[6.12]</sup>

影响的实验曲线。可以看出,苯甲酸锂的浓度小于 3mol% 时,  $\Delta n_e$  在 0.12 到 0.10 范围内,而苯甲酸锂浓度由 3mol% 增加到 5mol% 时,  $\Delta n_e$  显著下降 ( $\approx 0.01$ )。如果保持最大折射率差与用纯苯甲酸时相同,稀释后  $H^+$  的扩散系数则明显减小,例如  $T = 235^\circ\text{C}$ ,用 1mol% 苯甲酸锂稀释时,  $x$  晶向和  $y$  晶向的扩散系数大约是纯苯甲酸时的  $1/10$  和  $1/6$ <sup>[6,8]</sup>。采用交换后退火技术,可进一步减小折射率差和折射率梯度。图 6-17 示出了退火对折射率差及折射率分布的影响。最初在  $240^\circ\text{C}$  纯苯甲酸中交换 2.5h,得到阶跃折射率分布,然后在  $400^\circ\text{C}$  氧气氛中退火 4h。由曲线可以看出  $n_e$  的最大差值减小了约 25%,扩散深度由原来的  $3\mu\text{m}$  增加到约  $9\mu\text{m}$ 。

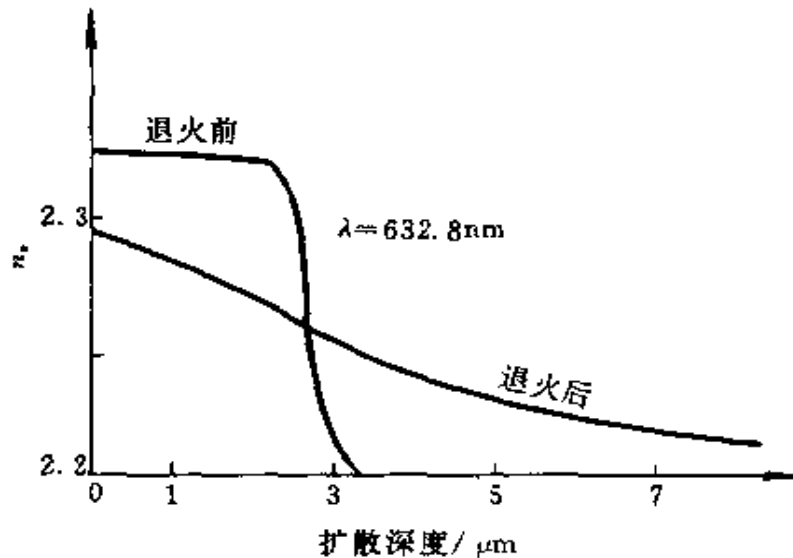


图 6-17 退火对波导折射率分布的影响<sup>[6,13]</sup>

采用纯苯甲酸作为质子交换源制作的波导存在一些缺点,人们发现其折射率增量不稳定,随着使用时间的加长和直流电场的作用,波导对光场的限制作用会退化。另外还发现用纯苯甲酸作质子交换制作的通道波导电光器件的电光效率下降,在相同模斑尺寸条件下,大约是 Ti 扩散  $\text{LiNbO}_3$  波导的  $1/3$ <sup>[6,8]</sup>。采用苯甲酸锂稀释苯甲酸和交换后退火技术制作的波导,则可以基本上消除这种光学不稳定性,并基本上恢复电光系数。麦克米金(McMeekin)等人对用这种质子交换技术和 Ti 扩散技术制作的通道波导的电

光系数采用干涉法和外差法进行了仔细测试,在  $0.633\mu\text{m}$  波长下 Ti 扩散波导的电光系数分量  $r_{33}$  为  $30.5 \times 10^{-12}\text{m/V}$  (干涉法) 和  $30.9 \times 10^{-12}\text{m/V}$  (外差法), 与纯  $\text{LiNbO}_3$  晶体的电光系数已经吻合得相当好, 而稀释退火质子交换波导的测试结果为  $r_{33} = 23.3 \times 10^{-12}\text{m/V}$  (干涉法) 及  $22.6 \times 10^{-12}\text{m/V}$  (外差法), 可见这种方法对其电光系数也有较好的恢复<sup>[6,14]</sup>。

产生前述光学不稳定性的一个原因是波导区的质子漂移。交换后的质子既可能与一个氧离子键合形成一个 OH 自由基, 也可能与两个氧离子键合形成氢键 OH 基。氢键 OH 基是引起质子漂移的主要原因。采用苯甲酸锂稀释和交换后退火技术减少了氢键 OH 基的浓度, 因此提高了波导的光学稳定性。交换区存在氢键 OH 基还会引起离子的导电性, 这将减小外电场的作用, 从而减小了电光效率。稀释和退火技术减少了氢键 OH 基浓度, 也就有利于恢复电光系数。但是, 氢键 OH 基浓度的减小会使离子导电性降低, 也就增强了光引入的内电场的作用, 从而恢复了波导区的光折效应, 这又增加了光学不稳定性。麦克米金等人在波导光功率密度约为  $20\text{kW/cm}^2$ 、外电场约为  $2.5\text{kV/mm}$  的条件下观察到采用苯甲酸锂稀释苯甲酸和交换后退火技术制造的通道波导中由于光折效应引起的这种光学不稳定性<sup>[6,14]</sup>。

质子交换  $\text{LiNbO}_3$  波导的最大优点是  $\Delta n_e \gg \Delta n_o$ , 因此对波导中传输的 e 光有很好的束缚作用, 而 o 光则失去约束而不能形成导模, 这样可以得到单偏振传输。目前制作高偏振消光比的器件时往往采用质子交换  $\text{LiNbO}_3$  波导。质子交换  $\text{LiNbO}_3$  波导的第二个优点是能产生大的折射率差  $\Delta n$ , 这对光栅波导、平面波导透镜、小曲率半径的弯曲波导(如环形谐振器)等波导器件十分有益。

### 6.5.3 离子交换

离子交换技术用于制作光波导与制作 GRIN 透镜有很相似的地方, 因此这里仅就制作光波导技术中的特殊问题作一介绍。

(1) 对于光波导特别是单模波导, 离子交换后产生的折射率差

$\Delta n$  一般都在  $10^{-2}$  量级, 扩散深度也仅几个微米, 与 GRIN 透镜相比要小得多。因此无须碱金属氧化物含量很高的特种 GRIN 玻璃, 只要  $\text{Na}_2\text{O}$  有一定的含量, 普通光学玻璃如 K8、K9 都可使用。常用离子交换对是  $\text{Ag}^+ - \text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+ - \text{Na}^+$  和  $\text{Cs}^+ - \text{K}^+$ 。由于  $\Delta n$  小, 熔盐中一价金属离子的浓度必须减小; 扩散深度很小, 不仅交换时间短, 而且可以用较低的扩散温度。以  $\text{Ag}^+ - \text{Na}^+$  交换为例, 制作波导时通常采用  $\text{AgNO}_3 + \text{NaNO}_3$  作为混合熔盐。 $\text{AgNO}_3$  与  $\text{AgCl}$  相比,  $\text{Ag}$  有较高的化学平衡常数, 因而容易产生大的  $\Delta n$ 。而获得所需的较小  $\Delta n$  的波导必须加入  $\text{NaNO}_3$ , 它不仅起到稀释  $\text{AgNO}_3$  浓度的作用, 实际上也起到“毒化”作用, 即  $\text{Na}^+$  可以减小  $\text{Ag}^+$  的化学平衡常数, 最终减小离子交换后玻璃中  $\text{Ag}^+$  的浓度, 获得较小  $\Delta n$ 。 $\text{AgNO}_3$  的沸点只有  $273^\circ\text{C}$ , 采用纯  $\text{AgNO}_3$  作熔盐时, 交换温度应该低于  $270^\circ\text{C}$ , 采用  $\text{AgNO}_3 + \text{NaNO}_3$  混合熔盐时常采用的扩散温度在  $270^\circ\text{C} \sim 360^\circ\text{C}$  之间。

(2) 在平面波导情况下离子交换扩散方程与 GRIN 轴向扩散方程相同, 其解亦为余误差函数  $\text{erfc}(x)$ , 这样得到的自然是 GI 波导。为了获得类阶跃折射率分布波导可采用加场离子交换。这时加场离子交换扩散方程的解为<sup>[6.15]</sup>

$$c_A = \frac{1}{2} c_0 \{ \text{erfc}(x' - r) + \exp(4rx) \text{erfc}(x' - r) \} \quad (6-12)$$

式中  $x' = x/w_0 = x/2\sqrt{nD_A t}$  为无外场时有效归一化扩散深度,  $n$  为 5.2.2 节中提到的罗斯曼—康菲尔德因子,  $r = \mu E_i / w_0$ 。图 6-18 是 WKB 法计算的  $\text{Ag}^+ - \text{Na}^+$  交换平面波导折射率分布曲线。无外电场时与余误差函数很接近, 有外电场时与式(6-12)结果相似, 接近阶跃折射率分布。

(3) 表面通道波导可通过金属掩模离子交换法制作。其  $\Delta n$  值、扩散深度和扩散宽度与掩模宽度有关, 如图 6-19, 图 6-20, 图 6-21 所示。当掩模宽度大于  $5\mu\text{m}$  时, 扩散深度与平面波导情况已经很接近。

(4) 埋入波导可以改善波导折射率分布的对称性, 产生接近于

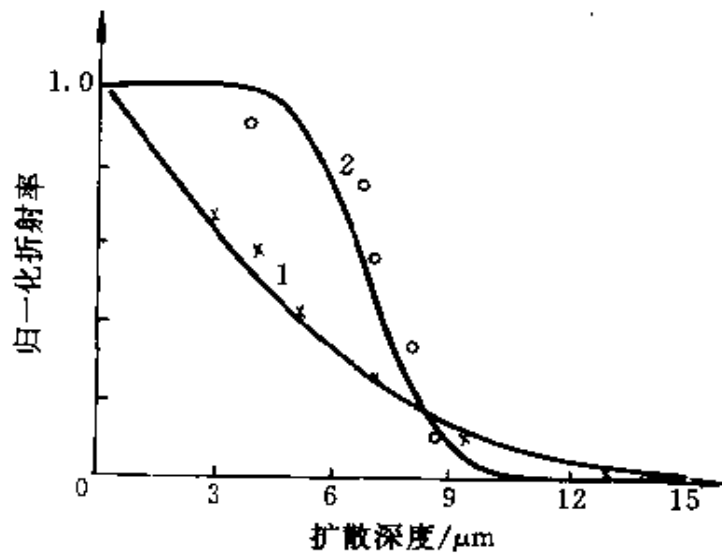


图 6-18 离子交换平面波导折射率分布 WKB 法计算曲线<sup>[6, 15]</sup>  
 ○—无电场；\*—有电场；1—拟合到 erfc 曲线；2—拟合到式(6-12)曲线。

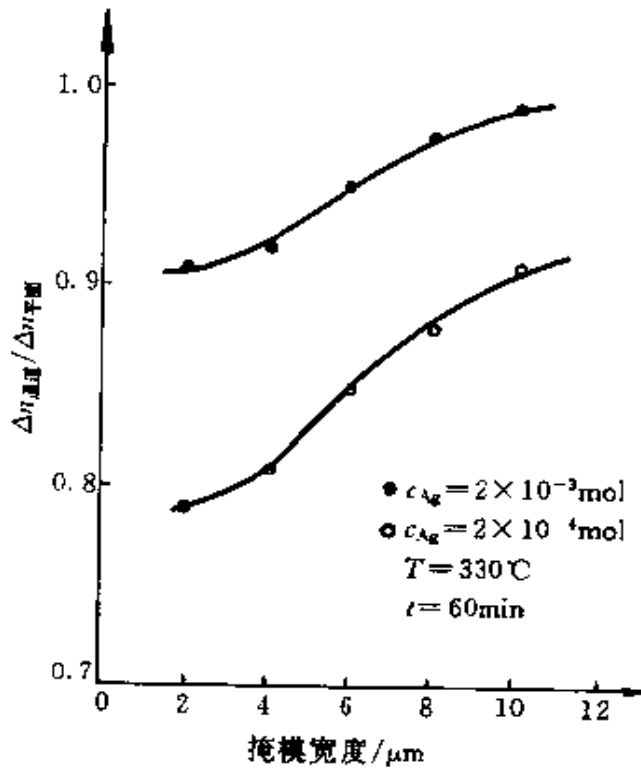


图 6-19 通道波导表面折射率差  $\Delta n$  与平面波导  $\Delta n$  比值  
 随掩模宽度变化<sup>[6, 15]</sup>

圆形折射率分布,从而有利于提高波导—光纤端面耦合效率。采用两步离子交换技术可以制作离子交换埋入波导。第一步先用金属

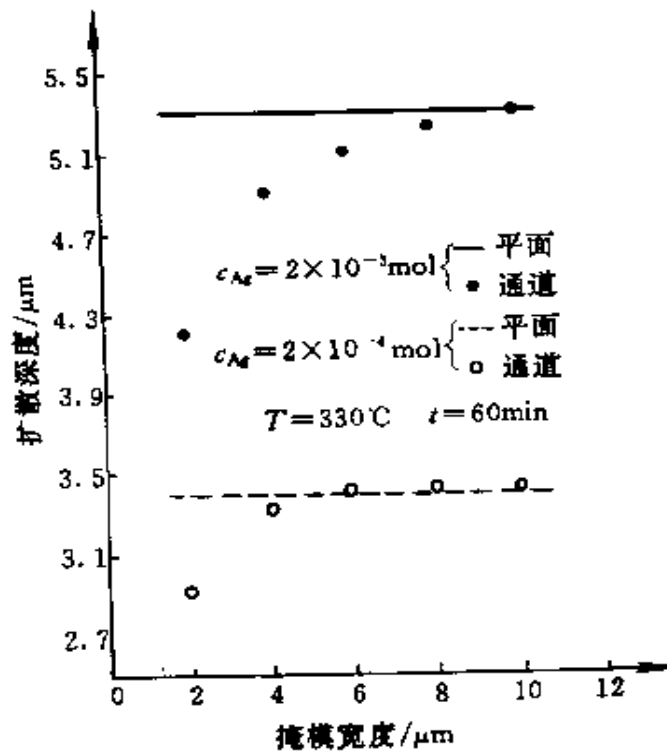


图 6-20 通道波导扩散深度随掩模宽度变化<sup>[6.15]</sup>

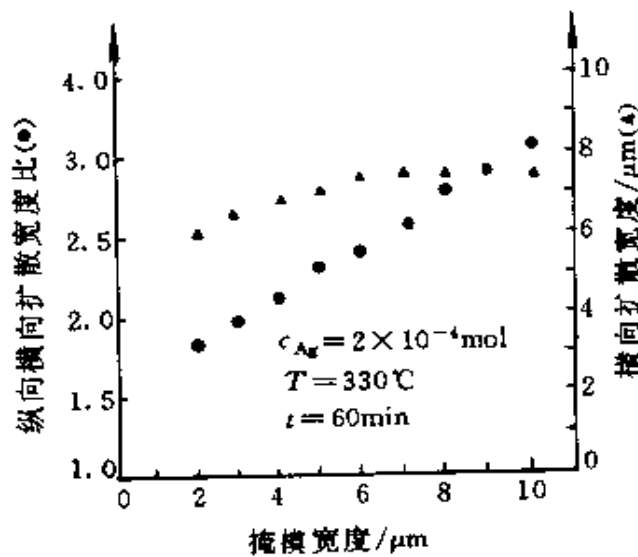


图 6-21 通道波导横向扩散宽度与掩模宽度之间的关系<sup>[6.15]</sup>

掩模电场辅助  $\text{Ag}^+ - \text{Na}^+$  离子交换产生近似 SI 分布的表面通道波导; 第二步去掉金属掩模, 在纯  $\text{NaNO}_3$  熔盐中进行第二次加场

离子交换,使玻璃中部分  $\text{Ag}^+$  扩散并交换出波导区,形成埋入波导。对两次交换的不同边界条件和初始条件解扩散方程,可以求出埋入波导的折射率分布,实验结果与理论计算结果基本一致<sup>[6,16]</sup>。这种埋入波导多用于制作多模波导。

## 参 考 文 献

- 6.1 Syms R, Cozens T. *Optical Guided Waves and Devices*. London: McGRAW-HILL BOOK COMPANY EUROPE, 1992. 403~412
- 6.2 蒋欣荣. 微细加工技术. 北京: 电子工业出版社, 1990. 67
- 6.3 孙雨南, 陈明彻, 秦秉坤, 丁汉章. 反射式闪耀变周期光栅分析. 北京理工大学学报, 1991, 11(4): 68~73
- 6.4 孙雨南, 崔芳, 张存林. 离子交换波导光栅耦合器. 第五届全国纤维光学与集成光学学术讨论会, 1992年10月, 厦门: 302~303
- 6.5 刘金声. 离子束技术及应用. 北京: 国防工业出版社, 1995. 172~270
- 6.6 孙雨南, 崔芳. 离子束溅射镀膜技术研究. 光学技术, 1992, (6). 6~8
- 6.7 Fukuma M, Noda J, Iwasaki H. Optical properties in titanium-diffused strip waveguides. *Journal of Applied Physics*, 1978, 49. 3693~3698
- 6.8 Tamir T. *Guided-Wave Optoelectronics*. Berlin: Springer Verlag, 1990. Beijing: reprinted by World Publishing Corporation, 1993. 148~169
- 6.9 Chu F S, Liu P L, Baran J E. Fabrication tolerance of  $\text{Ti} : \text{LiNbO}_3$  waveguide. *Journal of Lightwave Technology*, 1990, LT-8(5). 784~788
- 6.10 秦秉坤, 孙雨南. 介质光波导及其应用. 北京: 北京理工大学出版社, 1991. 1~37
- 6.11 项允楠. 偏振型和与偏振无关型  $\text{Ti} : \text{LiNbO}_3$  高速强度调制器的研究. 博士学位论文, 北京: 北京邮电大学, 1995
- 6.12 Suchoski P G, Findakly T K, Leonberger F J. Stable low-loss proton-exchanged  $\text{LiNbO}_3$  waveguide devices with no electro-optic degradation. *Optics Letters*, 1988, 13(11). 1050~1052
- 6.13 Micheli M De, et al. Independent control of index and profiles in proton-exchanged lithium niobate guides. *Optics letters*, 1983, 8(2). 114~115
- 6.14 McMeekin S, De La Rue R M, Johnstone W. The transverse electrooptic modulator (TEOE): Fabrication, properties, and applications in the assessment of waveguide electrooptic characteristics. *Journal of Lightwave Technology*, 1992,

LT-10(2):163~168

6. 15 Ramaswamy R V, Srivastava R. Ion-exchanged glass waveguides: A review. *Journal of Lightwave Technology*, 1988, LT-6(6): 984~1001
6. 16 Lilienhof H J, et al. Field-induced index profiles of multimode ion-exchanged strip waveguides. *IEEE J Quantum Electron*, 1982, QE-18:1877



---

## 内 容 简 介

本书介绍了 80 年代以来光学制造领域的最新技术和工艺,融入了三位作者及他人的最新研究成果。主要内容包括非球面数控加工技术,光学零件精密模压成型技术,超光滑光学表面加工技术,全息图和全息光栅的大规模模压生产技术,衍射光学元件制造技术,梯度折射率光学元件及光波导器件制造技术等。本书可供从事光学成像理论研究,光学仪器设计和光学制造工艺的科研人员及工厂技术人员参考,亦可作为大专院校有关教师、学生和研究生参考书。

ISBN 7-118-01728-0/TH · 118

---

定价:17.00 元