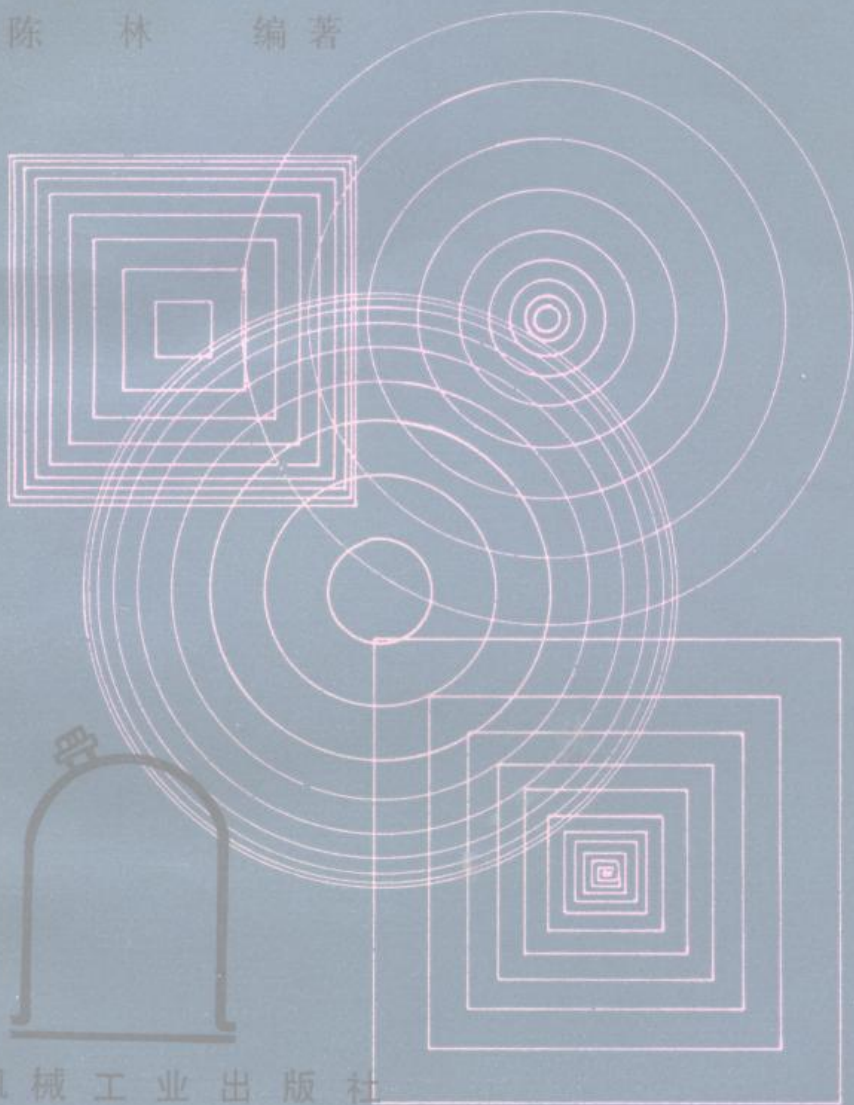


光学零件制造

(特种加工部分)

周鹏飞 史大道
陈林 编著



机械工业出版社

光学零件制造

(特种加工部分)

周鹏飞 史大道 陈林 编著



机械工业出版社

内 容 提 要

本书较为详尽地介绍了光学零件的特种加工,即光学零件的真空镀膜、化学镀膜、表面刻划、照相分划、光栅刻划及胶合等的工艺方法、工艺装备、材料及有关的基础知识。书末附有镀膜用金属材料、电介质材料及部分标准。

本书可供从事光学零件特种加工的工人阅读,亦可供有关技术人员、院校师生参考。

光学零件制造

(特种加工部分)

周鹏飞 史大道 陈 林 编著

*

机械工业出版社出版 (北京阜成门外百万庄南街一号)

(北京市书刊出版业营业许可证出字第 117 号)

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 $787 \times 1092^{1/32}$ · 印张 $14^{3/4}$ · 插页 1 · 字数 327 千字

1985年9月北京第一版·1985年9月北京第一次印刷

印数 0,001—4,000 · 定价 3.40 元

*

统一书号: 15033·5767

编者的话

本书介绍光学零件制造过程中的特种加工工艺，包括光学零件的真空镀膜、化学镀膜、表面刻划、复制技术、光栅制造技术以及光学零件的胶合等。

本书较为详尽地介绍了光学零件特种加工方法、工艺装备、材料及有关的基础知识。设计方法一般不在本书介绍。书中尽量反映近年来发展的新工艺、新技术、新材料。但对国内尚未成熟的工艺，只作适当介绍。

本书主要供从事光学零件特种加工的工人阅读，也可供从事这方面工作的工程技术人员、光学仪器专业的学生参考。

本书由周鹏飞编写第一、二、六章；史大道和陈林编写第三、四、五章及附录，并由上海光学仪器公司宋长标和上海光学仪器研究室毛书正审稿，在编写过程中得到很多同志的热忱帮助和支持，并提供宝贵的资料，在此一并致谢。

由于作者水平有限，经验不多，书中缺点和错误在所难免，恳切希望广大读者提出宝贵意见，以便改进。

目 录

第一章 光学零件的真空镀膜

一、真空基础知识	1
1. 真空与真空镀膜	1
2. 真空的产生	6
3. 真空管道与阀门	22
4. 真空材料与密封	24
5. 真空测量	29
二、真空镀膜机	31
1. 概述	31
2. 真空镀膜机的构成	34
3. 真空镀膜机的安装与调试	38
4. 真空镀膜机的使用和维护	40
三、真空蒸镀方法	45
1. 电阻热蒸镀法	45
2. 电子束轰击热蒸镀法	49
3. 反应热蒸镀法	53
四、膜层厚度的检测	56
1. 目视法	56
2. 光电极值法	59
3. 波长调制法	61
4. 石英晶体移频法	64
5. 差值指零法	66
五、真空镀膜中工艺因素的影响	68
1. 薄膜的形成及膜层结构	68
2. 真空度对膜层的影响	72
3. 沉积速率对膜层的影响	74
4. 基片温度对膜层的影响	75
5. 基片表面的清洁处理	76
6. 膜层厚度均匀性及夹具设计	82

六、真空镀增透膜	93
1. 增透膜的原理和应用	93
2. 单层氟化镁增透膜	97
3. 多层增透膜	103
4. 红外材料的增透膜	112
七、真空镀反射膜	115
1. 金属反射膜	115
2. 介质高反射膜	124
3. 金属-介质反射膜	135
八、真空镀分光膜	136
1. 金属中性分光膜	137
2. 介质中性分光膜	140
3. 偏振分光膜	143
4. 分色膜	145
5. 冷反光膜	148
九、真空镀滤光膜	152
1. 光密度中性滤光膜	152
2. 带通干涉滤光膜	153
3. 截止滤光膜	166

第二章 化学镀膜

一、酸蚀法镀增透膜	174
二、水解沉积法镀增透膜和分光膜	177
1. 原理	177
2. 硅酸乙酯及钛酸乙酯的制备	178
3. 镀膜工艺	182
4. 膜层疵病分析	189
三、化学镀银	191
1. 原理	191
2. 镀银溶液的配制	193
3. 镀银工艺过程	196
4. 镀铜及涂保护层	199
5. 镀银过程中的工艺因素影响	201

第三章 光学分划零件的刻划

一、刻划零件及其刻划方法	205
1. 刻划零件种类	205
2. 刻划方法	207
二、刻刀	208
1. 刻刀的材料	208
2. 刻刀的类型	210
3. 刻刀的制造与刃磨	215
三、刻划设备	221
1. 刻划机类型及精度	221
2. 圆刻划机	222
3. 长刻划机	237
4. 缩放刻线机	245
5. 刻划机的维护	251
四、机械法刻划	251
1. 圆刻机的校正	251
2. 长刻机的校正	256
3. 刻字机的校正	257
4. 度盘刻划工艺图示	257
5. 标尺刻划工艺图示	260
五、机械-化学法刻划	260
1. 原理及过程	260
2. 零件材料	261
3. 耐酸保护蜡层	261
4. 腐蚀液	265
5. 填色颜料	267
6. 机械-化学法图示	268
六、机械-物理法刻划	269
1. 原理与过程	269
2. 金属底层	270
3. 镀铬工艺图示	271
4. 真空镀黑铬工艺	273

第四章 光学分划零件的照相

一、照相方法原理	274
二、照相设备	275
1. 暗室设备	275
2. 照相机械设备	276
3. 绘图设备	278
4. 光源设备	279
5. 照相复制设备	281
三、照相及复制工艺	281
1. 初缩照相(湿片的工艺过程)	281
2. 精缩底版照相	292
3. 底版制取的其它方法	296
4. 几种常用的复制工艺	299

第五章 光栅制造

一、光栅概述	317
1. 计量光栅	317
2. 物理光栅	325
二、计量光栅的制造	326
1. 机械刻划法制造计量光栅	326
2. 复制计量光栅	331
3. 投影光刻计量光栅	334
三、物理光栅的制造	353
1. 刻划法制造物理光栅	353
2. 平面衍射光栅的复制	356
3. 全息光栅	365
四、光栅质量检验	374
1. 计量光栅检验	374
2. 物理光栅检验	382

第六章 光学零件的胶合

一、粘接剂	388
-------------	-----

1. 冷杉树脂胶	389
2. 甲醇胶	390
3. 环氧树脂胶	393
二、胶合定中心	396
三、胶合工艺	409
1. 冷杉树脂胶胶合工艺	409
2. 甲醇胶胶合工艺	411
3. 环氧树脂胶胶合工艺	413
四、胶合疵病及其产生原因	414
1. 脱胶	414
2. 表面变形	416
3. 透过率低或胶层不洁	419
4. 透镜中心偏或棱镜角度超差	420

附录 I 镀膜用金属材料

附录 II 镀膜用电介质材料

附录 III 刻划方法、工艺过程、特点及应用

附录 IV 光学零件薄膜、分划、胶合有关标准

第一章 光学零件的真空镀膜

真空镀膜是在抽成一定真空的容器（真空室）中，加热被镀材料（可以是金属或各种化合物），使之气化蒸发并沉积到被称为基片的抛光表面上，形成一层或多层薄膜。不同组成的薄膜具有不同的光学性能，于是就形成各种光学薄膜元件。

真空镀膜和其它镀膜方法（如化学镀膜、真空溅射、电镀等）比较，具有应用范围广、不受材料限制、薄膜厚度容易控制等优点，因此，是目前制备光学薄膜的主要手段。

用真空镀膜方法制得的光学薄膜，按其层数可分为单层膜、多层膜；按其材料可分为金属膜、电介质膜、金属-电介质组合膜；按其用途可分为增透膜、反射膜、分光膜、滤光膜和透明膜等。

一、真空基础知识

1. 真空与真空镀膜

真空和真空镀膜有着密切的关系。真空是指低于一个大气压力的气体状态。表明真空状态中气体稀薄程度的量称为真空度。真空度通常用气体压强的大小表示：压强低则真空度高；反之则真空度低。压强的单位是毫米汞柱，即以0℃时1毫米汞柱作用在单位面积上的力来表示，简称为“托”（1托 = 133.332帕斯卡）。它相当于

$$1 \text{ 托} = 1 \text{ 毫米汞柱} = \frac{1}{760} \text{ 标准大气压力}$$

压强低于1毫米汞柱时,用负指数表示,如写成 1×10^{-3} 托、 6×10^{-6} 托或 1×10^{-8} 毫米汞柱、 6×10^{-5} 毫米汞柱等。

没有气体分子的空间状态,称为“绝对真空”。绝对真空实际上是不存在的。所谓“真空”只是相对于大气压力而言。温度为 20°C 时,不同压强下的气体分子密度(以单位容积内的分子数表示)列于表1-1。

表1-1 20°C 时不同压强下的气体分子密度

压强 (毫米 汞柱)	760	1	1×10^{-2}	1×10^{-4}	1×10^{-6}	1×10^{-8}
分子密 度(个/ 厘米 ³)	2.5×10^{19}	3.29×10^{16}	3.29×10^{14}	3.29×10^{12}	3.29×10^{10}	3.29×10^8

真空状态具有与大气迥然不同的许多性质,利用这些性质可以应用到为数众多的工业部门和科学技术领域中。根据真空的产生方法、性质和应用情况,可大致把真空区域划分为五个范围,见表1-2。

表1-2 真空区域的划分和应用

名称	压强范围 (托)	获得方法	性质	应用
粗真空	$<760 \sim 10$	活塞泵、水环泵、螺杆泵、水喷射泵等	接近常压、气体放电现象开始出现	用于化学工业、油脂工业、食品工业、造纸工业中的蒸馏、干燥、液馏等
低真空	$<10 \sim 10^{-8}$	油封式旋转机械泵、罗茨泵、增压泵等	以分子间互相碰撞为主,能产生气体导电现象,分子平均自由路程为厘米级	用于灯泡工业、真空溅射、低温绝热等

(续)

名称	压强范围 (托)	获得方法	性质	应用
高真空	$<10^{-3} \sim 10^{-8}$	扩散泵 + 油封式 旋转机械泵	以分子与容器壁 碰撞为主, 热传导 和对流作用基本消 失	用于真空镀膜、 电子工业、真空冷 炼等。
超高真空	$<10^{-8} \sim 10^{-14}$	钛泵、吸附泵、 冷凝泵、分子泵等	具有超高真空的 表面物理特征	用于电子工业、 宇宙空间模拟、原 子能加速器等
极高真空	$<10^{-14}$	正研究中		

真空镀膜中, 预抽真空和离子轰击是在低真空状态下进行的; 而在蒸发镀膜时, 则必须在高真空的状态下进行。为什么镀膜需要在高真空的状态下进行呢?

首先, 被镀材料的气化分子要有足够长的平均自由路程, 才能够从蒸发源很快到达基片表面。

平均自由路程是指气体分子在每两次碰撞间所飞行路线的平均值。理想气体(高真空条件下的蒸气, 可认为近似于理想气体)的分子平均自由路程与气体分子的密度及其直径大小有关, 即

$$\begin{aligned}\bar{\lambda} &= \frac{1}{\sqrt{2}n\sigma^2} \text{ (厘米)} \\ &= 2.33 \times 10^{-20} \frac{T}{p\sigma^2} \text{ (厘米)}\end{aligned}$$

式中 $\bar{\lambda}$ ——分子平均自由路程(厘米);
 n ——气体分子密度(个/厘米³);
 σ ——气体分子直径(厘米);

P ——气体的压强(托);

T ——绝对温度(K)。

显然, 压强越低或分子直径越小, 气体分子的平均自由路程就越长。表 1-3 所列为几种气体分子在温度为 20°C 时, 不同真空度下的平均自由路程。

表 1-3 几种气体分子的平均自由路程

压 强 P (托)	分子密度 n (个/厘米 ³)	平 均 自 由 路 程 (厘米)			
		空 气	氮 气	氧 气	氢 气
760	2.5×10^{19}	6.21×10^{-6}	6.09×10^{-6}	6.6×10^{-6}	11.4×10^{-6}
1	3.29×10^{16}	4.72×10^{-3}	4.62×10^{-3}	5.02×10^{-3}	8.68×10^{-3}
1×10^{-1}	3.29×10^{15}	4.72×10^{-2}	4.62×10^{-2}	5.02×10^{-2}	8.68×10^{-2}
1×10^{-2}	3.29×10^{14}	4.72×10^{-1}	4.62×10^{-1}	5.02×10^{-1}	8.68×10^{-1}
1×10^{-3}	3.29×10^{13}	4.72	4.62	5.02	8.68
1×10^{-4}	3.29×10^{12}	4.72×10	4.62×10	5.02×10	8.68×10
1×10^{-5}	3.29×10^{11}	4.72×10^2	4.62×10^2	5.02×10^2	8.68×10^2
1×10^{-6}	3.29×10^{10}	4.72×10^3	4.63×10^3	5.02×10^3	8.68×10^3

平均自由路程只是一个平均值。在实际蒸发过程中, 有些气化分子的自由路程值会大于平均自由路程, 而有些气化分子则小于平均路程, 其分布规律可用下式表示:

$$P = (1 - e^{-L/\bar{\lambda}}) \times 100\%$$

式中 P ——在 L 路程内气体分子碰撞的几率;

L ——实际路程;

$\bar{\lambda}$ ——平均自由路程。

根据上式可算得: 当平均自由路程等于蒸发源到基片的距离 (即 $\bar{\lambda} = L$) 时, $P = 63.2\%$, 即只有约 $\frac{1}{3}$ 的气化分子到达基片表面, 当平均自由路程 2 倍于蒸发源到基片的距离 (即 $\bar{\lambda} = 2L$) 时, $P = 39.3\%$, 即 60.7% 的气化分子到达基

片表面；当平均自由路程10倍于蒸发源到基片的距离 ($\bar{\lambda} = 10L$) 时, $P = 9.5\%$, 即90.5%的气化分子到达基片表面。

在真空镀膜中, 蒸发源到基片的距离一般为150~400毫米, 因此, 在压强为 1×10^{-4} 托时, 就能够成膜了, 但为了提高蒸镀效率和得到更牢固的膜, 压强最好低于 5×10^{-6} 托。显然, 真空镀膜设备越大, 蒸发源到基片的距离越长, 对真空度的要求应越高。

需要高真空镀膜的第二个原因是和物质的饱和蒸气压有关。饱和蒸气压是指一定的温度条件下, 从物体表面逸出的分子和从空间回到物体表面的分子数量相等时的蒸气压, 饱和蒸气压高的物质分子容易从表面逸出, 反之, 就难逸出。外界压强低于物质的饱和蒸气压时, 该物质就处于蒸发状态, 外界压强越低, 蒸发速度越快。饱和蒸气压与温度有关: 温度高, 物质的饱和蒸气压高; 温度低, 物质的饱和蒸气压低。表1-4为几种金属及化合物的饱和蒸气压-温度值。

表1-4 几种金属及化合物的饱和蒸气压-温度值

材 料	符 号	熔点 (°C)	沸点 (°C)	各种饱和蒸气压强下的温度(°C)						
				1	10^{-1}	10^{-2}	10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}	10^{-6}
铝	Al	660	2400	1472	1293	1148	1024	927	841	768
铬	Cr	1900	2600	1695	1513	1364	1238	1130	1038	956
银	Ag	960	2180	1330	1163	1028	914	824	751	684
金	Au	1062	2660	1786	1574	1403	1260	1140	1038	953
铂	Pt	1769	3800	2531	2267	2049	1867	1715	1385	1471
钛	Ti	1850	3300	2191	1946	1748	1588	1453	1336	1235
铜	Cu	1083	2500	1617	1419	1264	1133	1025	934	857

(续)

材 料	符 号	熔点 (°C)	沸点 (°C)	各种饱和蒸气压强下的温度(°C)						
				1	10^{-1}	10^{-2}	10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}	10^{-6}
锌	Zn	419	907	490	408	345	293	256	212	180
三氧化二铝	Al ₂ O ₃	2020		2148	1949	1782	1638	1513	1403	
氟化钙	CaF ₂	1418		1585	1426	1293	1179	1081	995	
二氧化硅	SiO ₂	1710		2426	2049	1764	1541	1362	1216	
一氧化硅	SiO	1702		1360	1214	1092	989	900	823	

从表中可以看出：随着压强减小，达到饱和蒸气压的温度也随之降低。例如金属铝，在大气压的条件下需加热到2400℃才能气化蒸发，而在压强为 10^{-5} 托时，841℃就气化蒸发。这显然是十分有利的。

高真空镀膜的另一个原因是清洁。在高真空的环境下，一切气体成分（包括化学性质较活泼的气体 and 蒸气，如氧、二氧化碳、一氧化碳、水蒸气等）都将大大减少，灰尘和微生物也几乎全部被排除，因而可以得到较为纯净的膜层。

近年来，有些膜层对纯度的要求越来越高，如镀制远红外膜、远紫外膜时，需要在 10^{-8} 托甚至 10^{-12} 托的压强下进行。

2. 真空的产生

产生真空的过程称为抽真空或抽气。抽真空的工具称为真空泵，或简称泵。在真空镀膜中用机械泵产生低真空，用油扩散泵产生高真空，在需要超高真空的场合下，用升华钛泵及离子钛泵产生超高真空。

抽气机开始正常工作的压强叫做起始压强。不同型式抽气机的起始压强是不同的，例如机械泵的起始压强为大气压，

而油扩散泵的起始压强为低真空 (10^{-3} 托)。它需要以机械泵作为前置抽气机。

衡量抽气机性能的主要参数有极限压强, 最大反压强和抽气速率。

极限压强是指在真空容器漏气和放气可以忽略的情况下, 经过长时间抽气, 能够达到的最小压强。图 1-1 示出了机械泵 (I 段) 与油扩散泵 (II 段) 工作时的抽气曲线。如果不接入扩散泵, 则抽气曲线将沿着 I 段连续下去, 形成 III 段。比较 II 与 III

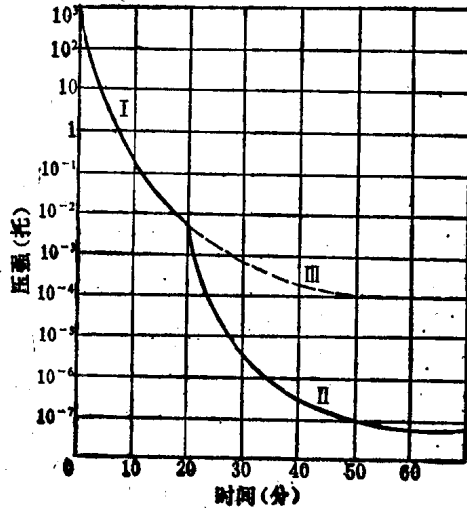


图1-1 机械泵与扩散泵的抽气曲线

段, 表明随着抽气的进行, 二曲线最后都平行于时间座标轴, 压强接近常数, 此常数即为极限压强。

最大反压强是指出气口允许的最大压强, 超过此压强, 抽气机就失去抽气能力, 一般来说, 起始压强就是最大反压强。对机械泵来说, 最大反压强应略高于大气压强。对扩散泵来说, 最大反压强越大, 前级机械泵的抽速可允许越低。

抽气速率简称抽速, 是指抽气机在一定的压强下, 单位时间内抽去的气体体积, 单位为升/秒。在机械泵或扩散泵上标明的抽气速率是指最大的抽气速率。实际上, 抽气机的

抽气速率是指在某一瞬时的压强下，抽气机进气口被抽出的气体体积对时间的导数，即

$$S = \frac{d_v}{d_t}$$

由图 1-1 所示的抽气曲线表明：抽气机开始工作时，斜率最大，抽气速率最高，以后，抽气速率随着被抽容器压强的下降而降低，最后抽气曲线平行于时间横坐标，抽气速率为零，达到极限压强。

抽气机的其它性能指标还有：电动机或加热器功率、抽气机体积和重量、抽气机工作时的振动和噪声、密封性（是否漏油）等。

（1）低真空的产生——机械泵

机械泵的种类很多，真空镀膜用的机械泵是一种油封旋片式机械真空泵，简称机械泵，外形如图 1-2 所示。

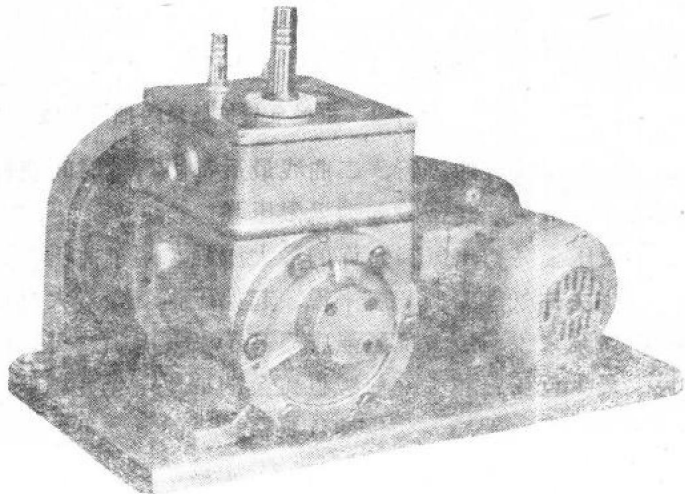


图1-2 机械泵外形