

衍射光栅

祝绍箕 邹海兴 包学诚 郭厚林 编著



机械工业出版社

衍射光栅

祝绍箕 邹海兴
包崇诚 郭厚林

编著



机械工业出版社

本书在叙述衍射光栅基本理论的基础上,介绍了光栅刻划技术和刻划机、全息光栅制造、光栅复制工艺以及测试技术,并对激光光栅作了扼要介绍。

本书可供衍射光栅研制人员以及使用者阅读,有关高等学校师生也可作参考。

衍 射 光 栅

祝绍箕 邹海兴 编著
包学诚 郭厚林

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登记证出字第117号)

北京市密云县印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经营

开本 787×1092 1/32·印张 12·字数 265 千字

1986 年 12 月北京第一版·1986 年 12 月北京第一次印刷

印数 0,001—1,230·定价 2.85 元

统一书号: 15033·6408

前 言

近年来,衍射光栅在工业生产和科学技术的发展中起着越来越大的作用。它作为色散元件,广泛用于光谱分析,是分析物质成分、探索宇宙奥秘、开发大自然的必用仪器。此外,随着现代技术的发展,衍射光栅也已大量用于激光器、集成光路、光通信以及工业计量和控制中。衍射光栅的重要作用推动了它的发展。目前,对衍射光栅的需要量日益增大,我国每年需使用成千上万块光栅就是一个例证。

鉴于衍射光栅的理论研究和制造技术已经取得富有成效的进展,并在实际工作中得到广泛使用,为了使人们熟悉、了解关于衍射光栅的基本理论、制造和测试技术,以利于衍射光栅的进一步推广、应用和提高,我们根据国内外有关资料并结合衍射光栅研制工作中的一些体会,编著了本书。

本书承蒙浙江大学董太和教授、陈远绳副教授、林中副教授和曹向群副教授审稿,在编写中得到长春光机所梁浩明研究员和浙江大学张仲先副教授的大力支持,并得到上海光学仪器研究所有关同志的帮助,在此一并表示感谢。

本书由祝绍箕主编。由于我们学识浅薄和缺少经验,书中缺点和错误在所难免,诚恳希望读者不吝指出,以便改正。

编著者

目 录

前言	
绪论	I
第一章 光栅的基本方程式	10
1-1 透射光栅方程式	10
1-2 反射光栅方程式	20
1-3 光栅方程式的电磁场理论推导	28
第二章 光栅的几何光学理论	35
2-1 光栅的工作原理	35
2-2 色散	39
2-3 分辨率	41
2-4 级次重叠	44
2-5 闪耀	47
2-6 光栅效率	52
2-7 谱线弯曲	59
2-8 阶梯光栅	69
2-9 凹面光栅	73
第三章 光栅的物理光学理论	92
3-1 电磁波的惠更斯原理	93
3-2 成象问题的傅里叶变换公式	98
3-3 光栅衍射的傅里叶变换	101
3-4 光栅衍射图样光强度分布的数字解	105
3-5 刻划误差和波面象差的关系	108
3-6 坯坯缺陷对衍射波面象差的影响	110
3-7 周期刻划误差的影响	112

3-8	多重周期误差的影响	116
3-9	杂散光	119
3-10	光栅各衍射级次的光能分布	122
3-11	正弦槽形光栅平面波衍射光能分布	125
3-12	三角槽形光栅平面波衍射的光能分布	136
3-13	光栅高集光效率的实际考虑	144
3-14	软X射线光栅(掠入射式光栅)效率	146
3-15	红外光栅的集光效率	149
3-16	光栅的衍射反常	154
第四章	刻划光栅和刻划机	158
4-1	光栅的刻划过程	158
4-2	光栅基坯的制备	159
4-3	金刚石刻刀	164
4-4	刻划机的环境要求	172
4-5	光栅刻划机的主要部件	179
4-6	机械式光栅刻划机	193
4-7	莫尔条纹控制光栅刻划机	205
4-8	干涉伺服控制光栅刻划机	213
4-9	不等槽距凹面光栅的刻划	240
第五章	全息光栅	243
5-1	全息光栅的制造原理	244
5-2	干涉条纹系统的精度	245
5-3	光学系统	250
5-4	激光器	254
5-5	光致抗蚀剂	257
5-6	平面全息光栅的制造	261
5-7	平面全息光栅的性能	284
5-8	凹面全息光栅	296
5-9	X射线全息光栅	308

5-10 全息光栅的展望	310
第六章 激光光栅	312
6-1 激光光栅的效率、选择性和耐功率	312
6-2 调谐激光光栅	318
6-3 光栅扩束器和光栅耦合器	322
第七章 复制光栅	326
7-1 反射式平面光栅的一次法复制	326
7-2 复制光栅的常见疵病	337
7-3 反射式凹面光栅的复制	340
7-4 红外光栅的复制	341
7-5 透射光栅的复制	342
第八章 光栅测试技术	343
8-1 概述	343
8-2 光栅波面象差的测量	343
8-3 光栅槽形的测量	351
8-4 光栅分辨本领的测量	355
8-5 光栅罗兰鬼线的测量	361
8-6 光栅衍射效率的测量	364
8-7 光栅杂散光和散射光的测量	370
参考文献	372

绪 论

一、衍射光栅的发展史

衍射光栅是一种光学元件，其上有规则地配置着线、缝、槽或光学性质变化的物质。目前衍射光栅不仅用于光谱学，而且已经广泛地应用于科研和生产，例如在计量、无线电天文学、集成光学和光通信、信息处理等许多领域中都有着十分重要的应用。

衍射光栅的制造史可以追溯到1786年。当时美国天文学家李敦豪斯 (Rittenhouse) 曾用平行的50至60根细金属丝制成12.7mm宽的衍射光栅，并在费城第一次做了光栅实验，这是光栅的起源。1821年，夫琅和费 (Fraunhofer) 为了观测太阳光谱，用铁丝制造了衍射光栅，虽然色散非常小，可就当时来说，则是做了很有意义的实验。1823年，他在平面玻璃板上敷以金箔，再在金箔上刻槽，做成具有较大色散的反射衍射光栅。夫琅和费通过光栅衍射实验，证实了光的波动学说，提出平面光栅原理，并且导出了光栅方程式。他还探讨了刻划光栅周期误差，槽形和不透光区与透光区的相对宽度的光谱效应。这些都是夫琅和费对衍射光栅所作的重要贡献。1846年，诺柏尔 (Noble) 制成240槽/mm的透射光栅，但因光栅的分辨率和强度较低，只能用作一种教学工具。1870年，卢瑟福 (Rutherford) 在50mm宽的反射镜上用金刚石刻刀刻划了3500条槽，这是第一块分辨率和棱镜相当的光栅。

十九世纪八十年代，罗兰 (Rowland) 为了系统地测量光谱线的波长，致力于光栅刻划技术的提高，制成了优良的

衍射光栅（最好光栅的刻划宽度为 152mm，槽数达 10 万条，分辨率超过 15 万），建立了关于衍射光栅的理论，并且首先制成了凹面光栅，试制成既简单而象差又小的分光仪。凹面光栅对紫外光谱的研究起着很大的推动作用。但是，罗兰是在铜锡合金上刻划光栅的，这种合金在可见光区域的反射率较高，而在近紫外区域反射率下降到 10% 以下，在真空紫外区域就更低了，因此光栅衍射效率也很低。后来，伍德（Wood）将光栅直接刻划在玻璃表面上，为了提高反射率，在玻璃表面镀上金属薄膜。安德逊（Anderson）和伍德还研究了光栅槽型对光强分布的影响，提出了“闪耀”光栅。

1947 年以前，光栅刻划机都是机械控制的。1948 年以后，应用干涉伺服系统来控制刻划机，标志着光栅刻划技术进入了新的阶段。光栅刻划采用了干涉伺服系统不但提高了刻划精度，而且扩大了光栅刻划面积并提高了各项技术指标。目前，能得到刻划面积为 $400 \times 600\text{mm}$ 的光栅（比罗兰时期刻划面积增大了 30 倍），刻槽密度从每毫米 30 条增加到 3600 条或更多（目前趋势不再增加刻槽密度而是减少），闪耀角从 15° 到大约 85° ^[9-12]。与罗兰时期相比，色散和集光效率提高了一个数量级，分辨率增加了 5 倍，数值达到百万级，而鬼线和杂散光减小了两个数量级。此外，还制成了特殊光栅（阶梯光栅、激光光栅等），能够很有成效地应用在从很短到很长的波长区，有的可用于强光中。

在这个时期，理论方面主要解决光栅衍射的成象理论，利用傅里叶变换描述衍射和象的结构，研究刻槽微细结构对衍射能量分布的影响，从而使大量高性能光栅得到了新的应用。

光栅刻划很费时间，又需要昂贵的设备，并且对刻划条

件要求很苛刻，所以提出了光栅的复制方法。此项工艺开始于1940年，开始时用火棉胶，直到1949年才用镀铝母光栅以真空蒸发法复制成功，到1955年进入商品生产。

1948年，盖伯 (Gabor) 发现了全息光学原理，随着六十年代激光技术的发展，出现了用记录激光干涉条纹制作光栅的技术，发展了所谓“全息光栅”。这种光栅在1967年制成，现在已大批生产和广泛应用。

我国的光栅刻划工作是在1958年由中国科学院长春光学精密机械研究所开始的。随后上海光学仪器厂和北京光学仪器厂分别在1959年和1963年也着手进行这方面工作。目前，我国从事光栅刻划生产的单位已增多，产量和品种不断提高和扩大，出现了蓬勃发展的局面。

随着科学技术的发展，对于光栅性能和刻划技术提出了许多更高的要求，成为当前光栅研究的重要课题。

在光栅性能方面，这些高要求主要是：

(1) 增大刻划面积和提高分辨率

在原子光谱和分子光谱分析、超精细结构分析和同位素分析、以及等离子体研究和激光研究等方面需要高分辨率光栅。在天文物理学方面，为了研究星体，特别是太阳的光谱和它的磁效应，要求大面积和高分辨率的光栅。为了开展上述研究，需要在近红外、可见和紫外区域具有30万~200万分辨率的光栅。

(2) 非等间距光栅

为了减小球差和象散，提出了刻划非等间距的平面光栅或凹面光栅，从而冲破了光栅刻槽间距恒定，即光栅常数的概念。这种非等间距光栅，可以用全息照相法制造，也可用光栅刻划机来刻划。实践证明，非等间距光栅与普通等间距

光栅相比，在相当大波长范围内，象散可以减小一个数量级。

(3) 全息计量光栅

利用全息照相方法，特别是利用两相同再现波前的全息照相法能够制造高精度的标尺和计量光栅，这对计量学的发展将起重要作用。利用氩离子激光器（514.5nm）制造的2000槽/mm的长250mm的位相计量光栅，精度可以达到 $0.1 \sim 0.3 \mu\text{m}$ 。

(4) 全息物理光栅

由于采用全息照相方法制造的光栅具有很多优点，特别是不使用会磨损的金刚石刻刀和刻划机，因而不产生鬼线，而且杂散光很小，所以全息光栅广泛应用于光谱仪器。但是它的槽形不易控制，必须加以研究解决。此外，对全息光栅如何提高效率，减小偏振和伍德异常现象尚需进一步研究。为获得高槽密度，大面积的全息光栅和消象层的凹面光栅等也尚需深入研究。

在光栅刻划技术方面，更高的要求主要表现在：

(1) 光栅刻划机的研究和改进

由于采用了干涉伺服控制系统，对丝杆精度要求可以适当降低。为了降低鬼线和杂散光的强度，必须致力于消除机械振动和槽距的零乱误差的研究，从而使它们低于主谱线强度的 10^{-5} 。

(2) 金刚石刻刀的合理刃磨和提高它的耐磨性

刻刀是光栅刻划的重要工具，合理选择金刚石刻刀的角度和刃磨技术是非常重要的。刻一块一般的光栅，刻刀要运行几公里，在这样长的行程中，要求刻刀不能损坏。

(3) 镀膜技术的提高

光栅的膜层不仅厚度要一致，而且要求具有适当的软硬

度、均匀性、牢固度以及较高的反射率。

(4) 大面积基坯的制备

在刻划大面积光栅时，要求提供无气泡、低膨胀系数的大坯料，坯料的抛光平面性要求达到 $\lambda/10$ 。

此外，光栅虽有一百年的发展历史，但是有关理论都还很落后，特别是光栅衍射效率、介质膜性质、光栅偏振、异常现象和槽形选择等问题均尚需作更深入的研究。

二、衍射光栅的类型

衍射光栅的种类很多，如按特性进行分类，可分成下列几种光栅：

(1) 按面形分类，有平面光栅和凹面光栅，凹面光栅又有球面光栅和非球面光栅之分。

(2) 按工作原理分类：有透射光栅和反射光栅。

(3) 按槽形分类：有正弦形光栅、矩形光栅和锯齿形光栅。锯齿形光栅又有阶梯光栅、中阶梯光栅和小阶梯光栅之分。

(4) 按制造方法分类：有刻划光栅、全息光栅、复制光栅。

(5) 按工作波段分类：有紫外光栅、可见光栅、红外光栅、远红外光栅和X光光栅。

(6) 按用途分类：有光谱光栅、计量光栅、耦合光栅、微波光栅、辐射光栅和偏振光栅等。

下面我们对不同用途的光栅作简单介绍^[1-2]。

1. 光谱光栅

光谱光栅，也称物理光栅，通常是由大量等间距、等宽度的平行刻槽构成的。它的作用如同棱镜一样，能将复色光进行色散，形成光谱以研究被激发的原子和分子的结构，以

及其他辐射源的性质。理论上,由无限宽的光栅形成的光谱衍射图样将是无限窄的。理想的有限宽度的光栅也只能产生有限宽的衍射图样,即具有一定的分辨率。能产生理想的有限宽度衍射图样的光栅称为无象散光栅。用单块254mm宽的光栅,在可见区获得了 10^6 以上的分辨率。由单块光栅和几块光栅串联或并列使用连续衍射可以达到极高的分辨率。通常,只有平面光栅能够正确地产生无象散光谱。凹面光栅,往往是刻划在球形或其他曲面形状的表面,而在其弦上具有准确的间距,它所形成的光谱线带有相当大的象差。由于凹面光栅不能产生无象散光谱,所以它不适用于高分辨率工作。然而,凹面光栅与平面光栅不同,它具有聚焦特性,不需要准直光学系统和照相光学系统即能形成光谱。由于平面光栅必须引入准直镜和聚焦镜,所以存在由它们造成的附加反射损失,这是不够理想的,而凹面光栅则较为优越。这点,对于紫外和X射线区的应用是很重要的。

2. 微波光栅

在射频和微波范围内,为了使用接收器,常常安置金属的圆柱形和抛物线形天线,使之成为有规则的光栅状的系统。这类微波光栅都用于天文学中。

3. 计量光栅

光波应用于干涉仪中,为计量提供了最准确的长度基准。利用一对光栅,其中一块是固定的,而另一块是运动的。当光通过时,能够获得相当于干涉仪中得到的那种条纹信号,即所谓莫尔条纹信号。用在计量上的光栅,一般地是从同一块刻划母光栅上复制取得,但也可由刻制或照相复制而成。标准的两块计量光栅具有互相平行而又一致的刻槽,并且如在干涉仪中那样采用光电接收器记录调制光束。对于一对计量

光栅,彼此移动一条刻槽(现代计量光栅常采用4~250槽/mm)就移动一条莫尔条纹,条纹宽度不受波长影响,并且条纹较宽可进行内插,由于误差平均效应,因而可以获得很高精度。

4. 辐射光栅

当一电子束在真空中加速,并垂直于金属光栅刻槽入射传递时,在适当的条件下会产生电磁辐射,这种电磁辐射的波长和辐射方向与电子束的加速电位和光栅刻槽数有关。例如,320kV的加速电压,入射到每毫米约800槽的光栅上,输出波长约为500nm,电磁辐射方向与光栅大约成 20° 角;而应用150mm宽、槽距为6.35mm、槽深为2.5mm的光栅,借助于150kV的加速电压,可以产生波长为10cm的辐射。所以利用这种光栅,不仅能够在可见、紫外和红外光谱区产生辐射,而且可以产生厘米波辐射。

5. 偏振光栅

利用金属丝(例如铜丝等)格栅能够交替地反射平行于金属丝的具有矢量 E 的波,这种光栅能够达到偏振的效应。

三、衍射光栅的基本特性和选择

衍射光栅的基本特性主要包括下列几个方面^[6-8],

(1) 槽密度:光栅的槽密度即每毫米刻槽数,对于刻划光栅通常是0.5~5880槽/mm^[9-11],槽密度受机床限制,全息光栅的槽密度,通常是600~6000槽/mm,槽密度受所用波长限制。

(2) 光栅尺寸:光栅尺寸即指刻划面积,对于刻划光栅,尺寸由经济因素和仪器要求决定,最小分辨率是决定光栅尺寸的重要因素之一。全息光栅的尺寸可比刻划光栅大,但前者通常采用较高的槽密度和较小的尺寸。

(3) 工作波长范围:刻划光栅可以应用于紫外、可见

和红外光谱区域，全息光栅主要应用于紫外、可见和近红外光谱区域。

(4) 效率：刻划光栅在闪耀波长处，效率为60~99%。在远紫外区由于膜层反射率的下降，使光栅效率也显著降低。全息光栅的最大效率主要取决于 λ/d 之比(λ 为所用波长， d 为光栅槽距)，一般低于刻划光栅的效率。为了获得较高的效率，需要制造闪耀全息光栅。

(5) 鬼线和杂散光：刻划光栅的鬼线强度一般为主谱线强度的 $10^{-4} \sim 10^{-6}$ ，如果采用双干涉仪伺服控制系统，则能大大降低鬼线强度和杂散光。全息光栅一般无鬼线，杂散光比刻划光栅更小。

(6) 分辨率：光栅的分辨率取决于光栅宽度、工作角度和波长。在一定范围内，刻槽间距愈小，分辨率愈高。当然，实际分辨率也取决于杂散光水平。全息光栅由于杂散光小于刻划光栅，因而有利于提高分辨率。

(7) 象差：用于平行光时，刻划光栅和全息光栅都没有象差。用于非平行光时，刻划光栅有象差，而全息光栅则有校正象差的可能性。

(8) 膜层：光栅膜层有铝、金、铂、氟化镁、氟化锂和二氧化硅等。选择适当膜层能在给定的波长范围内具有最大效率，而且膜层还可作保护层用。

(9) 信噪比：光栅的信噪比一般都能满足仪器要求，在大多数情况下，全息光栅比刻划光栅更好。

(10) 高能量激光束作用：刻划母光栅(不锈钢基底)可以用于高能量激光束中，而全息光栅则不能用于高能量激光束。

(11) 环境要求：无论是刻划光栅或全息光栅，都能经

受 $60 \sim -60^{\circ}\text{C}$ 的温度变化；在 35°C 时能经受 95% 的湿度达 24h；能经受 12Hz 时 $4g_n$ （重力加速度， $1g_n = 9.81\text{m/s}^2$ ）和 2000Hz 时 $40g_n$ 的两垂直方向的振动；以及能承受高于 10^{+16} 电子/ cm^2 的电子流，高于 $5 \times 10^{+13}$ 质子/ cm^2 的质子流和 $50\text{W}/\text{mm}^2$ 的连续激光束的能量而不损坏。

(12) 价格：光栅价格的高低主要决定于光栅的尺寸和槽密度。全息光栅的价格一般低于刻划光栅。

本书着重叙述光栅理论、用于光谱学的物理光栅和激光光栅的制造以及测试技术。

光栅的应用极其广泛，例如物理光栅是光谱仪器的核心，是精度要求极高的关键元件。最近二十多年来，光栅几乎完全代替了棱镜用作光谱仪器的色散元件。若没有光栅，就不能装备现代光谱仪器，就会影响地质、冶金、石油化工、天文、农业、医药、原子能、航天以及其他科学技术领域的发展。这就是为什么光栅技术日益受到人们重视的原因。

第一章 光栅的基本方程式

1-1 透射光栅方程式

从理论上讲，平行等宽而又等间隔的多狭缝，就是衍射光栅，这种透光的多狭缝称为透射光栅。实际上的任何装置，只要它能起到等间隔地分割波阵面的作用，都可以称为衍射光栅。因此，也可以在镀有金属（如铝、金、银等）的平面（或凸面、或凹面）反射镜上刻划出许多等间隔、等宽度的，平行的刻痕（槽）来实现，这就称为反射光栅。

物理光学中，在讨论双缝衍射现象时，我们已经得到一些普遍适用的规律。当两个狭缝发出的光波产生干涉时，由于每个狭缝具有一定的宽度，因此它发出的光波还受到衍射规律的限制。因而，双缝干涉条纹要受到单缝衍射的调制。由此类推，讨论多缝衍射时，同样可以认为多狭缝衍射光强度是多光束干涉光强度被单缝衍射光强度调制的结果。衍射光栅的色散就是多狭缝的干涉和衍射效应。

如图1-1所示， S 为处于透镜 L_1 焦平面上的狭缝状光源，

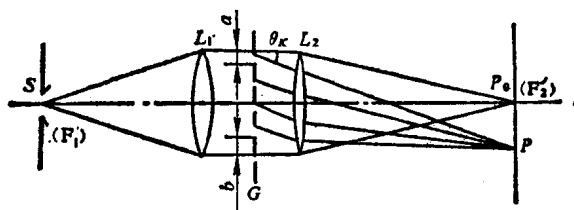


图1-1 多狭缝的干涉和衍射效应