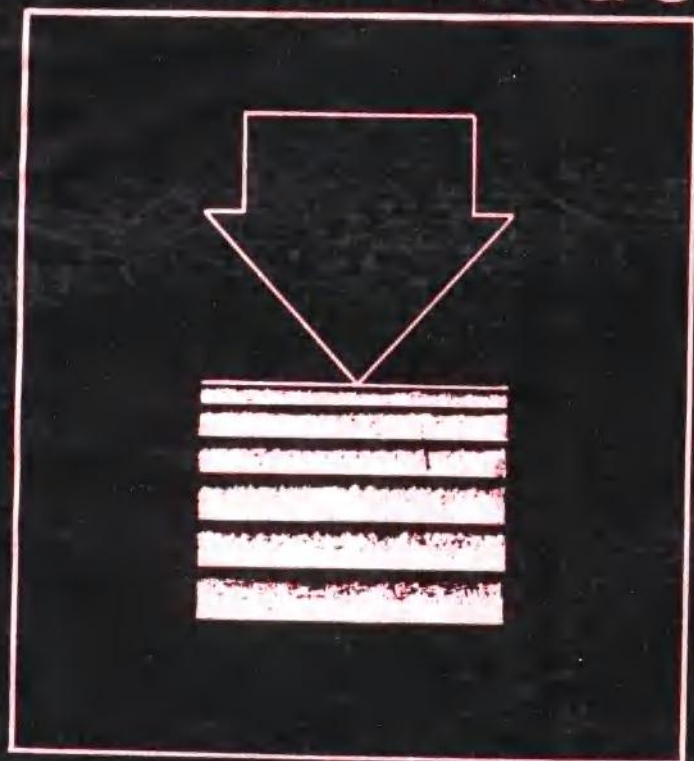


衍射光栅

M. C. 哈特雷 著

贾惟义 秦小梅 译

DIFFRACTION GRATINGS



贵州人民出版社

内 容 简 介

本书是英国 N.H. March 和 H.N. Daghish 主编的“物理技术”丛书之一。全书分九章，论述了光栅理论、各类光栅的制造、光谱性能和效率反常、光栅的光谱学和其它方面的应用；评述了光栅的发展历史和现状。

本书兼顾理论和实用，可供光学工程技术人员、光谱学工作者和有关院校师生阅读和参考。

衍 射 光 栅
【英】 M.C. 哈特雷著
贾惟义 秦小梅 译

贵州人民出版社出版
(贵阳市延安中路9号)

贵州新华印刷厂印刷 贵州省新华书店发行
787×1092毫米 32开本 11.5印张 230千字
印数 1—2000

1990年5月第1版 1990年5月第1次印刷

ISBN 7-221-01448-5/TB·03 定价 4.50元

前 言

衍射光栅为人所知已有150多年。由于它在光谱仪器中作为色散元件的重要性，一直是受人重视的、持久的研究课题。设计和制造刻划光栅所用的机器，是要求工程师来完成的最迫切的任务之一。多亏了光栅刻划工程师们自上世纪末以来的献身努力，光栅质量得到了不断的改进。由于优质复制光栅的广泛使用，棱镜越来越多地被光栅所取代。到了60年代中期，有关光栅的制造和测试、有关用以刻划光栅的仪器设计，已积累了大量的知识和实践经验。自那时以来，有两个方面出现迅猛的发展，为这一课题开拓了新天地：第一是光栅制造中的干涉技术（即所谓全息技术）；第二是利用大型计算机求解麦克斯韦方程，使之能圆满地描述光栅的特性。

在编写本书时，我力图做到三件事：第一，以比大多数光学教科书略为深的程度，论述了光栅的基本内容，除了基础理论外，还包括光栅制造、测试和应用等各种实际问题。第二，总结了某些新近的发展，考虑到这门技艺已经建立起来的目前状况，对这些发展给予评述和展望。第三，我借此机会，介绍了这一课题中我认为特别具有魅力的一些问题。这样一来，本书有点象教科书、评论文章和个人文摘的一种混合体。因此，从所设想的原有知识水平来看，读者可能会感到某种不协调。因而我尽可能避开数学细节，希望其内容

能为任何具有一定基础知识的人所接受。我特别希望本书能帮助光谱学家认识光栅的性质和实际限制如何影响仪器的性能，帮助他们最有效地使用手中的光栅。

有关光栅的课题既广又深，某些方面不可避免地只能做一些肤浅的介绍。因此，有必要指出某些本书不想涉及的问题：本书不打算详细介绍光栅刻划机的发展，只是简述相关的原理；也不想详尽介绍光栅的电磁波理论，而仅给出相应的原理和主要结果的概貌。这些课题的进一步细节，可分别在Stroke (1967) 和 Petit (1980) 的著作中找到。最后应注意，本书的主题是光栅，着重但不仅限于光谱光栅。本书不涉及光谱仪器的设计，也不涉及光谱学问题，尽管这些方面新近的许多进展在很大程度上归因于新型优质光栅的使用。

我愿向所有对本书的出版做出过贡献的人，不论是直接阅读并校正过本书部分内容的人，还是间接向我转述过他们的知识和经验而使我受益的人，在这里铭记下我的谢意。我特别要感谢 J.F.Verrill 先生，J.Wilson 夫人，J.Kirby 夫人和 R.F.Stevens 先生，感谢他们珍贵的帮助。

M. C. 哈 特 雷
国家物理实验室
1981年10月

目 录

前 言

第一章 引 论	(1)
---------	-----

第二章 理 论	(13)
---------	------

1. 波的传播和相互作用	(13)
--------------	------

2. 复幅度——多重狭缝	(20)
--------------	------

3. 一般光栅方程	(24)
-----------	------

4. 色散	(28)
-------	------

5. 分辨率和分辨能力	(30)
-------------	------

6. 自由光谱区和衍射级的交叠	(35)
-----------------	------

7. 闪耀光栅刻面角的计算	(38)
---------------	------

8. 透射光栅	(41)
---------	------

9. 闪耀理论的限制	(43)
------------	------

10. 借助傅里叶变换描述光栅	(44)
-----------------	------

11. 光栅的量子力学描述	(55)
---------------	------

书 目

第三章 光栅在光谱仪器中的应用	(61)
-----------------	------

1. 光谱仪器	(61)
---------	------

2. 光栅和棱镜的比较	(74)
-------------	------

书 目

第四章 光栅的制造	(77)
-----------	------

1. 刻槽的制造	(78)
----------	------

2.机械公差·····	(83)
3.刻划机·····	(86)
4.刻槽位置的控制·····	(93)
5.伺服控制系统·····	(99)
6.钻石刀架·····	(99)
7.环境控制·····	(101)
8.振动隔离·····	(103)
9.刻划机——小结·····	(104)
10.干涉光栅·····	(105)
11.干涉仪·····	(110)
12.干涉仪的安装·····	(116)
13.光谱性能·····	(117)
14.光栅的复制·····	(138)
第五章 光栅的光谱性质 ·····	(142)
1.分辨能力·····	(143)
2.干涉法评价衍射波阵·····	(146)
3.光谱纯度：衍射效应·····	(154)
4.光谱纯度：光栅缺陷·····	(157)
5.杂散光的测量·····	(160)
6.效率·····	(170)
7.刻槽形状的测量·····	(172)
8.光栅槽距的目测估计·····	(179)
9.效率的测量·····	(180)
第六章 光栅效率的反常和电磁理论 ·····	(192)
1.效率反常和理论·····	(192)
2.光栅理论·····	(195)

3. 表面等离子体振荡	(212)
4. 表面等离子激元的散射	(217)
5. 布儒斯特角效应、理论数据的约化和光栅 对光的总吸收	(219)
6. 电介质涂层对反常的影响	(223)
7. 反常的排斥	(226)
8. 小结	(229)

附录6.1 在沟槽晕化光栅情况中的互易定理	(231)
-----------------------------	-------

书目

第七章 凹面光栅	(234)
1. 罗兰圆	(236)
2. 球面象差	(240)
3. 象散性	(241)
4. 凹面光栅聚焦性质的一般性处理	(242)
5. 凹面光栅装置	(248)
6. 象差矫正光栅	(253)
7. 象差矫正刻划光栅	(270)
8. 利用光线跟踪技术分析聚焦性质	(271)
9. 凹面光栅的效率	(275)
10. 凹面光栅的波阵检验	(282)
11. 小结	(286)

书 目

第八章 X 射线光栅	(289)
1. 掠入射角光学	(289)
2. X 射线光栅的设计	(297)
3. X 射线光栅的制造	(303)

4. X射线光栅性能	(312)
5. 掠入射下的凹面光栅	(315)
书 目	
第九章 衍射光栅的非光谱学应用	(320)
1. 引言	(320)
2. 计量光栅的制造	(330)
3. 应变测量和形状测量	(332)
4. 光栅用作分束器	(335)
5. 线栅偏振器	(338)
6. 用于光波导的光栅耦合器	(339)
附 录 光栅的选择	(341)
后 记	(345)
参考文献	(347)

第一章 引 论

当一束行波遇到一个大小与其波长相当的障碍物时，波中的部分能量就会被散射。如果障碍物是周期性的，或实际上它的某一参量是周期变化的并能影响波的传播，能量就被散射到不同方向或不同的“衍射级”，具有这种功能的结构，即可称之为“衍射光栅”。从某一衍射波的观点来看，光栅的作用是改变波的传播方向，改变的程度则依赖于波长和周期性之间的关系。如此，一个光栅可将许多不同波长的波分离而形成一个谱，因而它起到与棱镜相似的功能，但在许多方面它的性能更好，而且使用更为方便。

原理上，任何周期结构通过和适当的波动相互作用，都可以产生衍射状态。类似地，任何波动一旦与适当的光栅相互作用，就可以分裂成一个谱。例如，无线电波可以和海洋表面上的浪波相互作用，在航海仪器中有时就必须考虑到这一因素。晶体是原子的周期阵列，它们对X射线和电子的衍射实际上是整个晶体学的基础。衍射现象在自然界和家庭中都可看到：它赋予某些小鸟的羽毛以光泽；使唱片泛起彩色闪光；透过雨伞上的织物观看街道上的灯光，可看到衍射为绚丽的图案。有这样一个故事，一位教授曾因雷达陷速器的误读而遭到责难，他事后说服他的行政长官，使这位长官相

信，这次误读是由一个波状铁篱笆的衍射引起的。光栅真正的重要性在于能产生一个谱，特别是电磁辐射谱，通过对这种谱的详尽分析，使人们能研究辐射源或辐射介质的性质。术语“谱”是指辐射按各种波长的分布，或是指这种分布的展现。光谱学的基础，是将出现的各种各样的波长分离开来，并排列成序，以便将它们显示为一个谱。例如，放电中原子发射出的光含有较少的分立的波长，而在另一些情况下，诸如来自黑体的发射，所有波长都存在，形成一个连续谱，或称为“白光”。

有两类光谱仪器，**光谱仪**和**单色仪**，前者用作测量或显示一个光谱，后者用来从光谱中选取并传输单一波长的光或一个窄的光波带。光栅仪器利用光栅将辐射按不同波长改变传播方向，从而将光谱的不同分量分离开来。为了避免谱的混合，辐射波必须以十分确定的方向进入色散元件（可以是光栅或棱镜）。要做到这点，须令辐射波通过一个狭缝和准直器。辐射经过色散之后，再将其聚焦，使光谱显示为狭缝的一系列像，像的位置按其波长而定。当发射光谱具有分立波长时，这些谱以狭缝的一系列像或“**谱线**”的形式出现。在连续谱的情况下，则有无限多的谱线彼此并叠。

每一种原子和每一种分子都具有它自己的特征谱，借助这种特征谱可将它鉴别出来。**光谱学**（即光谱分析）是一门应用范围极广的学科。例如，在医院里，它用来分析血样；在工业上，用来控制生产过程和产品质量；在钢铁生产中，用来检验熔液成分；在各种各样的产品中，用来探测杂质的微小含量。在研究工作中，光谱学的应用更是多种多样、千差万别。一方面，它能使我们研究原子的最内部的特性；

另一方面，它又是我们探索恒星构成的唯一手段。这些工作的核心是衍射光栅。在许多光谱仪器中，光栅仅占其成本的一小部分，但光栅质量却从根本上决定着所能获得的光谱质量。正因为如此，才使得衍射光栅变得如此重要并成为本书讨论的主题。我们将讨论光栅的各种特性如何影响光栅仪器的性能；在过去的一个多世纪中，为改进光栅的质量，人们如何坚持不懈地奋斗；为什么这种奋斗还在继续下去。

尽管任何周期装置都能起衍射光栅的作用，但我们主要讨论的将仅限于一维阵列，它实际上是由一系列处于同一平面内的这种或那种形式的等间隔平行线组成。任何形式的波动都能被相应的光栅所衍射，但只是在光学范围内光栅才是最重要的，它已发展到高度完善的程度。所得到的许多结果，同样可应用到声波或水波的衍射问题上来。我们这里主要关心的是用于电磁辐射的光栅，特别是用于从红外到X射线的光谱光栅。实际上，大多数光栅是由一块适当的刚性基坯构成，它的一个面具有光学表面，在其上制造出一系列等间距平行沟槽。这样的光栅如图 1.1。

衍射光栅的发明，应归功于美国天文学家 D. Rittenhouse。1786年，当他透过一块细丝手绢观看远处的光源时，被所产生的现象迷住了。为了在可控制的条件下重复这一现象，他在两根由钟表匠制作的细牙螺钉之间，平行地绕上头发丝，做成一个正方体。当他在暗室里透过这个装置去看百页窗上的小狭缝时，观察到三个亮度差不多相同的像，在每边还有几个另外的像，“离主线越远，它们越暗淡，有彩色，并且有些模糊”。他注意到，红光比蓝光弯曲得厉害。他将这些现象归因于衍射。他没有能够进一步去测量光的波长，但

他正确地预言，继续深入研究，“对于光这种有趣的物质，会做出新的有趣的发现”。

1822年J. Barton爵士偶然地开发利用了光栅产生光谱颜色的现象，他是伦敦造币厂副监，有一次，他得到一份专利，题为“将分光彩色应用于钢或其他金属表面的制版术及利用相同办法制造各种装饰品”。文中主张利用钻石在钢上刻划出交叉栅网，开拓光谱分解的应用。这种做法的目的，是制作一种印模，为当时城市里衣着华丽的男士们制造新奇的金属背心钮扣。

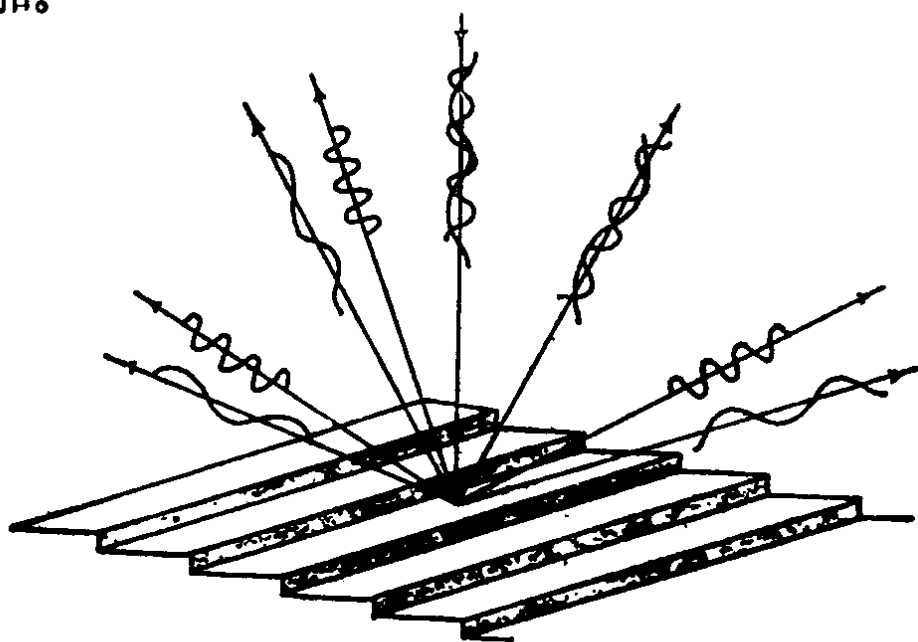


图1.1 在衍射光栅的作用下波动被分解为不同的光谱级

但是，正如今天我们知道的那样，发明衍射光栅的荣誉应该归于弗琅何费 (Fraunhofer)。1821年，他利用细丝光栅，完全独立地重复了Rittenhouse的实验。他还利用钻石刀尖在一块镜子表面刻划出沟槽，制造出反射光栅。他制作的最精细的光栅仅12毫米宽，刻有9600条线，这使他能够对其性能进行充分的研究，首次测量了光的波长。他继而解释

了衍射现象，推导并验证了光栅方程，讨论了刻槽形状和位置误差对光谱的影响。他为此后持续了150多年并仍在进行的研究奠定了基础。

弗琅何费于1826年逝世。在此后的半个世纪里，光栅很少受人关注。问题在于如何制造出一块光栅，它不仅能产生一个彩色谱，而且其性能可与棱镜媲美。在一个镜面上刻划沟槽制成的光栅，要比由平行细丝构成的光栅更实用，这一事实变得越来越明显，也正是在这一点上，英文和德文术语开始出点毛病。把一系列平行细线类比成小型栅（或网格、栅栏，德语称为Gitter）是很贴切的，但如把镜面上制成的一系列沟槽称作栅就不那么准确了。

最初，光栅的制造是由钟表匠担负的，他们是唯一具有工作经验，能够达到所要求的精细尺寸和高精度的人。实际上，人们认为刻制Barton钮扣的分度机，是由W.Harrison制造的，他是航海计时仪的发明者J.Harrison的儿子。到了19世纪末，瑞利从理论上证明，光栅分辨光谱线的能力超过棱镜(Rayleigh, 1874)。1882年，罗兰在巴尔的摩市琼斯·霍普金斯大学，制造出他称之为“刻划机”的机器，并用它制出了光栅，其分辨能力被证明的确超过了棱镜。罗兰一般被誉为刻划机的创始人（如果在技术上不称他为发明者的话）。这是一种能在两个垂直方向上产生运动的装置，当磨制沟槽时，钻石刀比较快地运动，当钻石刀从一条沟槽移到下一条时，在垂直沟槽方向上相当缓慢地运动。刻划光学光栅所要求的公差，其数量级一般为可见光波长的一个小的分数，刻划机被认为是一种现有的最精密的机械工具。罗兰不仅建造了第一个真正成功的刻划机，而且他还发明了凹面光栅

(Rowland 1883)。在凹面光栅中，刻槽被刻划在凹球面镜的表面上。这样的光栅不仅将光色散成谱，而且还把它聚焦成清晰的象。这就有可能扩大新型仪器的设计范围，也大大地扩展了能够研究的波长范围。

在巴尔的摩的工作由 J.A.Anderson, R.W.Wood 和 J.Strong 继续了下去，并获得巨大成就。一直到第二次世界大战前，琼斯·霍普金斯大学都是世界上衍射光栅的主要供应地。R.W.伍德 (1910) 创造了一门技术，通过改变光栅沟槽的形状，控制光在各衍射级中的分布。在这种通常称为“闪耀”的技术中，沟槽具有锯齿形，可把沟槽的刻面看成是一系列小平面镜，它们倾向将光反射到某一选定的衍射级方向上去，因此增加了在那一级中能量的比例 (图1.2)。

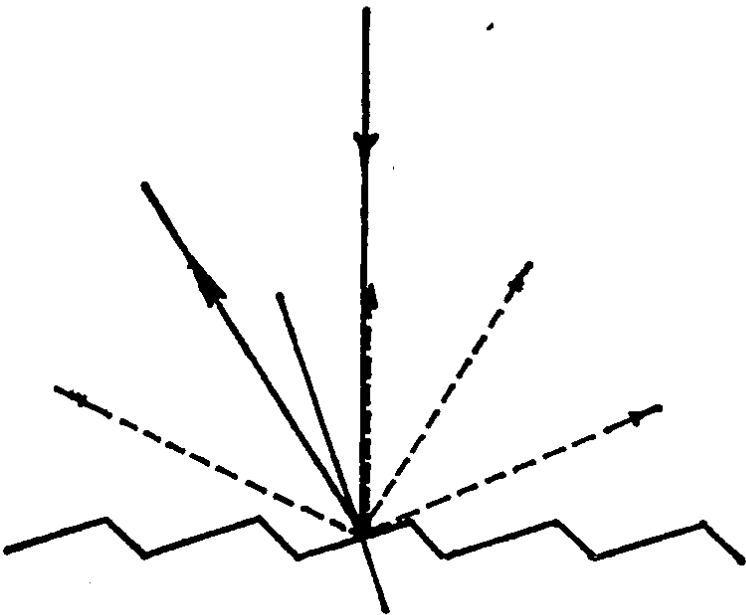


图1.2 利用闪耀光栅将能量集中到某一选定的衍射级内

Strong (1935) 采用真空蒸镀金属薄膜的方法，能够在玻璃坯表面上的铝一类金属薄膜上刻划出光栅来，而不是直接刻

刻在镜铜合金坯上。新的坯板不仅容易获得和加工，而且铝的反射率比镜铜高，因此光栅效率较高。

在此期间，英国的Otto Hilger为Blythswood爵士建造了一台刻划机，于1908年投入使用，后来转移到国家物理实验室，在那里用来刻划光栅，直到1958年被赠送给科学博物馆。芝加哥大学的迈克耳逊对刻划光栅的技艺曾做出卓越的贡献，他提出利用干涉仪控制刻槽的位置(Michelson 1915)。但几乎只有完美无缺的产品才能使他满意，所以他实际上做出的光栅寥寥无几。他曾有一块光栅好象使他很满意，但在一次晚宴上失手摔破了。这次不愉快的事件，似乎使他在光栅界得到了与他所取得的重大技术成就同样大的名声。但是，他的工作无论如何也不会白费。他所制造的第一台刻划机，后来转移至纽约州罗彻斯特城的鲍许·隆光学公司。正是因为这次转移，在很大程度上使他们对衍射光栅产生了兴趣，把迈克耳逊的技术成就转化为商业利益，进而成为世界上最主要的光栅供应商。这台刻划机，经过修改和更新，现在仍被用来生产商品光栅。迈克耳逊的第二台刻划机在麻省理工学院得到进一步发展，成为有名的MIT“A”型机。

在所有早期的和许多后期的刻划机中，刻槽的位置都是由一根丝杠来定位的，光栅质量取决于螺纹和轴承的精度。丝杠的缺陷，如椭圆度、偏心度或摇摆性，对刻槽位置都会产生周期误差，这会导致产生虚假的谱像，称之为鬼线。人们费尽心血，努力减小鬼线，制造出了能补偿丝杠误差的特殊凸轮。但最根本地限制刻划机精度的是制造丝杠所用原材料的刚性和稳定度。当人们涉及到数量级仅有几个原子直径大小的位移时，即使刚性最好的材料做成的刻划机，干起活

来也象是用橡皮做的那样不稳定。这个前进中的障碍被 Harrison 和 Stroke (1955) 所克服，他们把迈克耳逊关于用干涉仪控制伺服系统的设议付诸实现。这样一来，刻槽位置是相对光的波长确定下来的，早期机器中要求十分严格的丝杠，现在仅用来将基坯沿垂直沟槽方向平移。

1950年，T. Merton 爵士提出一个完全不同的解决丝杠误差问题的办法，后来由 L. A. Sayce (1953) 领导的小组在国家物理实验室将其实现。在此办法中，光栅是在车床上按精确的螺旋线形状分两步加工出来。第一步是利用精密车床在一个黄铜圆柱体上加工出螺旋线，这个螺旋线保留了该车床丝杠的误差，然后被用于第二台机器，加工出第二个消除这些误差的螺旋线。第二台机器是一台螺旋车床，带有一个弹跳木髓螺母，这个螺母跨越了第一个螺旋体的许多沟槽，并能将其误差平均掉。这种技术的优点是避免了在“平床”刻划机内钻石刀和基坯二者的间歇运动。但它也有极大的缺点：光栅处在一个圆柱上，而不是一个平面上。为了把此光栅移植到平面上，将一块塑料薄膜在螺旋体上成型，然后剖开，在光学平台上用明胶复制成型。当明胶变硬时，将塑料薄膜取走，在复制品上镀铝。这样制成的光栅，其光学质量也会因塑料薄膜变形而受到限制。但是，不管怎么样，用此法可以制造出质量较好的用于红外辐射的光栅。由于其实用性和低成本，这种光栅为50年代红外光谱学的发展做出了重大贡献。

在光栅刻划中遇到的另一个基本问题，是钻石刀具的磨损和破裂。在一块光栅中，沟槽的总长度有时会超过30公里，为了保持效能的均匀性，在整个刻划过程中，钻石刀的

形状必须没有任何可察觉的变化。对于光谱分辨率要求较高的大型光栅来说，这个问题尤为突出。然而，1949年 Harrison 指出，光栅分辨率不依赖于沟槽的数目，而是依赖于光栅的宽度。他解决钻石刀磨损问题的办法是刻划粗距光栅（例如每毫米79条），用于大角度入射时的高衍射级。在随后的25年里，他的小组在麻省理工学院制造了一组三个刻划机，生产出可能是分辨率最高的光栅。这类光栅通常称为“中阶梯光栅”，它的使用却带来了这样的困境：一个粗距光栅能产生大量衍射级，不同衍射级的光谱发生重叠。为了解开这些光谱，就需要利用第二块光栅或棱镜，沿其正交方向产生色散。这是许多光谱学家曾经准备要付出的代价。

在光栅工艺中最重要的发展之一是40年代末由 White 和 Fraser 发展起来的高质量复制技术，就其重要性来说，仅次于刻划机的发明。在这种技术中，将一种非粘附性涂料在真空中镀到光栅表面，接着镀反射层，通常是铝。在铝膜上浇注一层树胶，在树胶层上压上一块玻璃坯，它的一个面常常经过处理，以改善与树胶的粘合性。当树胶固化后，用力将此夹层体剥离，这样就在玻璃坯上的树胶中制成了光栅的复制品。现在，这种技术的应用很广泛，以至于被光谱学家视为理所当然的事，但这样对待一件特别精密的花费巨资生产出来的光学器件，还是相当粗暴的。复制技术的重要性，不在于它是一种改善光栅性能的手段（尽管在某些情况下它能够做到这点），而在于它扩大了光栅的可得范围。自本世纪初以来，在对光栅的了解和生产两个方面，虽取得了巨大进步，但直到50年代以前，在商品光谱仪器中，光栅却还未开始取代棱镜。这种推迟不是因为光栅不适用，而是因为在复