

全息光栅

庄夔 刘桂琴 李永贵

一、前言

衍射光栅是由一组平行线槽所组成，利用多缝衍射原理，使多种波长的光束，分成了单色光束。它是单色仪、分光计和光谱仪的优良的分光元件，广泛地应用在冶金、地质、化工、国防、天文等部门。从1882年以来，衍射光栅都是在光栅机上刻划出来的，叫做“刻划光栅”。后来又有以刻划光栅或复制光栅为母光栅，用复制法制成的“复制光栅”。近年来，国际上出现了一种新型的工艺方法，它是用全息摄影的办法，将全部信息记录在涂有光刻胶的毛坯上，经显影后，就形成了一定线槽的衍射光栅，这种光栅叫做“全息光栅”；它的优点是没有鬼线，杂散光弱，分辨本领较高，使用波段较宽；它的缺点是集光效率较低，槽形较难控制。这几种光栅相辅相承，成为光谱仪器中不可缺少的关键分光元件。

1948年，盖伯(D. Gabor)首先发现了全息摄影原理。20世纪60年代发明了激光器，推进了全息术的发展，1967年鲁道夫(D. Rudolph)等人应用全息原理制作衍射光栅。全息光栅的研制，在国际上法国居首位，法国Jobin—Yvon公司1970年已批量生产各种全息光栅（也有刻划光栅）和几种单色仪、分光光度计，该公司早在1967年就研制出全息光栅。

二、全息光栅的制作原理和方法

两束相干的激光光束相交形成一个干涉场，或叫做全息场，场内出现明暗相间的条纹。将涂有光刻胶的毛坯放入干涉场，经曝光、显影、真空镀膜后就成为衍射光栅。

平面光栅或I型凹面光栅是由两束平行光相干涉而成的（见图1），这种相干平行光所形成的干涉场可见图2。

在图2中，传播方向平行于XY平面的二单色光束相重叠，

$$S_1(x, y) = [J(x, y) \cdot \exp[i(\phi_1 + 2\pi \frac{ct}{\lambda} + \phi_1)]]$$

$$\text{和 } S_2(x, y) = U(x, y) \cdot \exp[i(\phi_2 + 2\pi \frac{ct}{\lambda} + \phi_2)] \dots \dots \dots (1)$$

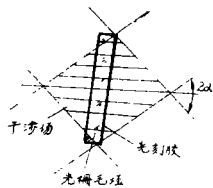


图1 平行光束干涉场

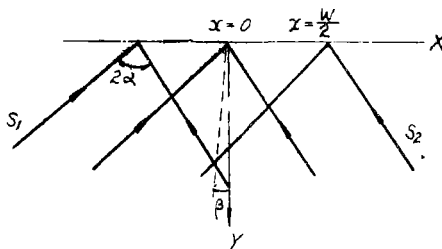


图2 在X-Z平面上干涉条纹的形成

如果这些光束是平行光束，我们可以写成：

$$\begin{aligned} \phi_1 &= \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \sin i \\ \phi_2 &= \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \sin i' \end{aligned} \dots\dots\dots (2)$$

从图 2 可知：

$$2i = \alpha + \beta, \quad 2i' = \alpha - \beta,$$

如果 i 和 i' 是在 XY 平面法线的两侧，那么 i' 是负的，由于我们关心的只是空间频率，而不是干涉极大和极小的位置，故我们可选择 $\phi_1 - \phi_2 = \theta$ ，重迭区产生强度分布：

$$\begin{aligned} I(x) &= \left\{ U \cdot \exp \left[i \left(\phi_1 + \frac{2\pi c}{\lambda} t \right) \right] + U \cdot \exp \left[i \left(\phi_2 + \frac{2\pi c}{\lambda} t \right) \right] \right\} \\ &\cdot \left\{ U^* \cdot \exp \left[-i \left(\phi_1 + \frac{2\pi c}{\lambda} t \right) \right] + U^* \cdot \exp \left[-i \left(\phi_2 + \frac{2\pi c}{\lambda} t \right) \right] \right\} \\ &= A^2 + B^2 + 2A \cdot B \cos(\phi_1 - \phi_2) \dots\dots\dots (3) \end{aligned}$$

式(3)对应于等间距条纹。如果 $A = B$ ，最大的强度变化值是从最小的零到最大的 $I(x) = 4A^2$ 。从式(2) 和式(3) 可得条纹的间距：

$$d = \frac{\lambda}{\sin(\alpha + \beta) + \sin(\alpha - \beta)} = \frac{\lambda}{2 \sin \alpha \sin \beta} \dots\dots\dots (4)$$

如果选择一个对称系统($\beta = 0$)则：

$$d = \frac{\lambda}{2 \sin \alpha} \dots\dots\dots (5)$$

式中： d ——光栅常数
 λ ——光波波长
 2α ——光束夹角

当我们选用 $\lambda = 4880 \text{ \AA}$ 时，拍照 600 条线/毫米光栅， $2\alpha = 16.^\circ 8$ 。

II、III 型凹面光栅则是由两束发散光束相干而成的，光源点在罗兰圆上的为 II 型（见图 3），光源点不在罗兰圆上的 III 型。

三、全息光栅的制作工艺

全息光栅的制作工艺过程是：

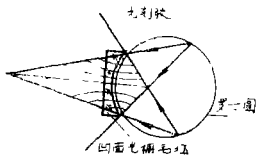


图 3 发散光束干涉场

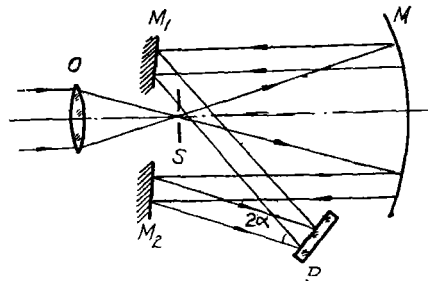
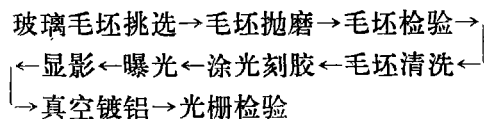


图 4 分波前系统干涉图

O —会聚透镜， S —针孔， M —抛物面镜，
 $M_1 M_2$ —平面反射镜， P —光栅毛坯。



全息光栅所使用的玻璃毛坯要求和刻划光栅毛坯一样，光刻胶则选用虫胶（本所自行配制）和AZ1350胶，在超净工作台甩胶机上用离心法涂胶，选择适当的转速来得到适当的胶膜厚度。干涉系统是由本所加工的，安置于下垫有塑料软垫的2.5米×1.3米的隔振铸铁平台上。我们用“分波前干涉系统”（见图4和图5），抛物面镜M的焦距为1100毫米，口径为370毫米，精度为 $\frac{1}{6}$ 光圈；两平面镜 M_1M_2 面积为 165×125 毫米²，平面度为 $\frac{1}{7}$ 光圈。光源目前暂用上海亚明厂的和本所的5瓦氩离子激光器。

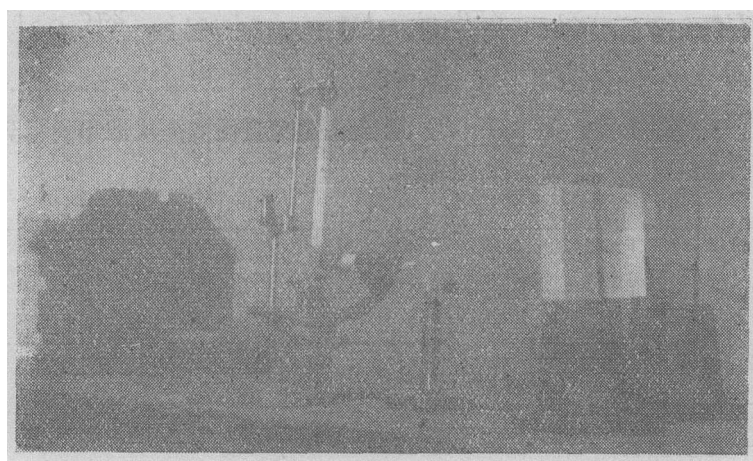


图5 全息光栅分波前干涉仪照片

将涂好虫胶的毛坯置于干涉场中，曝光约15分钟以上后，取下放入无水乙醇（优质纯）中显影，显影温度大约 $15^{\circ} \sim 20^{\circ} \text{C}$ ，显影时间3~10分钟，用蒸馏水冲洗后，置于离心机上甩干或用吹风机吹干即成。我们于1979年做出了多块600条线/毫米平面试用光栅，表面不理想，有斑纹等缺陷，其中7904光栅集光效率为：

5461埃	4358埃	3650埃	3132埃	2537埃
19%	26%	23%	20%	3%

1980年9月和1981年，做出了I型和II型凹面试用光栅，分别为R100，R350，R1000多块，表面也有缺陷，由于缺少测试手段，未能检测。

1979年底，与北京光学仪器厂协作，用进口的18瓦氩离子激光器作光源，感光材料用美国Shibley公司的AZ1350j正型光致抗蚀剂和本所配制的虫胶。

甩胶机为北京半导体设备一厂的CJ-3A型超净工作台，其离心机空载最高转速达4500转/分钟，AZ1350甩胶后，前烘10分钟，温度 65°C ，充分冷却后，在全息干涉仪上曝光，用AZ303显影，时间根据试验而定，再用蒸馏水冲洗后，在甩胶机中甩干，后烘30分钟，温度 120°C ，然后再真空膜铝便得衍射光栅。

我们做出多块1200条线/毫米（ 50×50 毫米²）全息平面衍射光栅，集光效率为：

编 号	5461埃	4358埃	3650埃	3132埃	2537埃	光刻胶	光栅表面
1212—1	26	27	33	33	28	虫胶	稍 差
1220—3	26	27	31	30	24	AZ1350	较 好

四、几点讨论

(一)、重要环节:

制造全息光栅有三个重要环节是光源(氩离子激光器)、光刻胶、干涉仪。前面两个环节尤为重要,但干涉仪也需作相应的重视,各个光学元件需保证一定精度,(一般都要求 $\frac{1}{10}$ 光圈),才能使干涉条纹的精度达到要求,制造消象散凹面光栅则按着凹面光栅理论安排干涉仪,当然关于防尘、恒温、恒湿、清洁等要求,也需要相应的措施。

(二) 光源:

制作全息光栅时,光源选用氩离子激光器,它的输出功率大,单色性好。因而法国的约宾——伊冯公司和国内几个单位都是用美国的18瓦氩离子激光器(国内正在试制)。

氩离子激光作用过程主要发生在等离子体放电管中。放电管中充氩气(低压),在大电流密度的放电条件下,使氩离子电离并激发,因而产生激光。典型的氩离子激光谱线见表1。

表 1

波 长(埃)	相 对 强 度	输出功率(瓦)
5286.90	弱	} 共3瓦
5145.32	强	
5017.17	弱	
4965.07	一般	
4879.86	强	
4764.85	一般	
4726.86	弱	
4657.89	一般	
4579.35	一般	
4545.05	弱	
3637	一般	
3514	弱	
3511	弱	
3358	弱	
3345	弱	
3336	弱	

制作全息光栅时,多采用4579埃,3637埃也有采用4880埃的。还有一种激光器,称作“连续紫外激光器”,估计对全息光栅的制作很有好处,可惜没有商品。它的激光谱线见表2。

表 2

离子	波 长(埃)	功 率(瓦)	输出反射镜%	相对贡献%
Ar ⁺	3637	61	98	50
	3511			50
Ar ⁺	3358	17	97.5	25
	3344			45
	3336			30
Ar ⁺	3054	3.8	99	5
	3024			40
	3002			55
Ar ⁺	2754	0.4	98.5	100

也有用 *He—Cd* 激光器作光源的, 多半使用 4416 埃谱线, 但因功率小不常用。

从试验可知, 单谱线、单模的激光功率最好在 3~6 瓦以上, 也就是总功率要大于 18 瓦, 则做出的光栅质量较好。在其他条件相同时, 用大功率的激光器, 有足够的曝光量, 线条有足够的深度, 因而集光效率较高, 即使是密线条的, 也能做出。功率太小, 则曝光时间长, 曝光量不足。长时间曝光外界因素影响大, 因而质量低, 甚至做不出密线条的光栅。如果勉强不加小孔、标准具、波长选择器等, 则激光为多模多谱线, 虽然功率大了, 拍照出来, 除了条纹对比不好外, 还有斑纹(可直接在干涉场用显微镜看出), 所以不能保证质量。

由此可见, 要制成合格的全息光栅, 必须要有单谱线功率大的和质量好的激光器(也是定向槽形研究的必要设备之一)。

(三) 光刻胶

制作全息光栅的感光材料, 要求鉴别率高, 感光灵敏度高, 与毛坯的粘附性能好, 显影后呈凹凸形, 而不是呈黑白线, 还要求在加工和使用过程中不易变形。通常选用光致抗蚀剂(光刻胶), 如: 美国的 *Shipley* 公司的 AZ1350, 日本的 *OFPR* 等, 个别单位也有用虫胶和明胶的。

本所配制的虫胶配方如下:

甲	虫胶	100克
	氨水	100毫升
	水	900毫升

水浴熬制成 650~700 毫升

乙	重铬酸铵	6克
	酒精	12毫升
	水	30毫升

甲、乙两液配制即成。

虫胶是负型胶, 也是属于紫外胶(正型胶是感光部分溶解于显影液中), 虽然虫胶做的光栅效率稍高, 但光栅表面和稳定性没有 AZ1350j 正型光致抗蚀剂好, 故一般多采用 AZ1350 光刻胶。

(四) 匹 配

在制作全息光栅时，值得注意的一点，是激光光源谱线与光刻胶的光谱灵敏区相匹配。希望大功率的谱线落在光刻胶的灵敏曲线的峰值位置M处（见图6）。

现在的情况并不理想，如需改善则有如下两个办法：

(1) 研究加入增感剂，使光刻胶的光谱灵敏曲线的峰值位置向4880埃移动。

(2) 选用大功率紫外氩离子激光器的3637埃谱线，或选用其他激光器接近4100埃（M处）的大功率谱线。

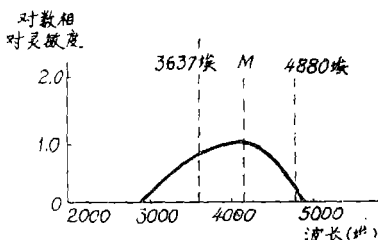


图6 AZ1350的光谱灵敏曲线

制造全息光栅的环节较多，要得到最佳条件，需从理论和试验两个方面进行较多的工作，每个环节都要有监测手段，例如：甩胶速度、激光功率、显影等的监测，则对得到稳定的最佳条件很有好处。

(六) 定向槽形的研究

现在全息光栅的槽形多半是近似正弦形的，因而不是闪耀光栅。国际上正在开展获得三角形槽形的全息闪耀光栅的研究^[1]，已有：驻波法、双重曝光法、离子蚀刻法、付里叶合成法等，但都处于试验阶段。要使全息光栅得到广泛的应用，定向槽形的研究是必不可少的，我们今后将大力开展此项研究试验工作。

总之，由于全息光栅的杂散光弱，使用波段宽、凹面光栅能消象散，因而越来越多地使用在单色仪及要求杂散光弱的光谱仪器中，制作工艺也将日趋完善。

参 考 文 献

- [1] M. Breidne et al, Opt. Acta, (1979), 26, №11, 1427~1441.