

全息平面光栅的制作及其参数测定

光栅是一种光学元件，其上有规则地配置着线、缝、槽或光学性质周期性变化的物质。从广义角度讲，任何一种装置和结构，只要它能给入射光的振幅或相位，或者两者同时加上一个周期性的空间调制，都可以称之为光栅。换言之，任何一种具有周期性的空间结构或光学性能周期性变化（如透射率、折射率）的衍射屏统称为光栅。光栅分透射光栅和反射光栅两类。透射光栅按透射率函数的不同可分为普通的矩形透射率光栅和正弦光栅两种。闪耀光栅是反射光栅的一种，有较高的能量利用率，凹面反射光栅能自动聚焦成像。决定光栅性能的基本参数有三个：光栅的周期或空间频率（周期的倒数）；槽形（一个周期内的具体结构）；光栅的衍射效率。

根据制作方法的不同，可分划线光栅、复制光栅和全息光栅 3 种。

全息光栅是用全息照相的方法制作的一种分光元件。与用普通方法制作的刻划光栅和复制光栅相比，全息光栅没有周期性误差，杂散光少，分辨率和衍射效率高，制作的环境条件要求较低，因而其应用越来越广泛。

实验提供全息实验装置一套（防震台、反射镜、分束镜、扩束镜、光学支架及磁性座等），He-Ne 激光器，定时快门，全息感光胶片（干板），暗室冲洗器材等。

【实验原理】

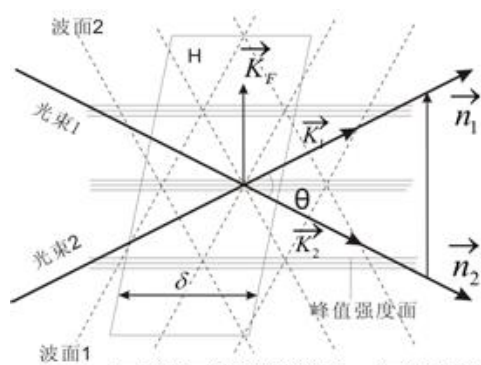


图1 两列相干平面光波相交时干涉现象

当两束相干的平面波以一定的角度相遇时，在他们相遇的区域内便会产生干涉，其干涉图样在某一平面内是一系列平行等距的干涉条纹，其强度分布则是按余弦规律而变化，即干涉图样的强度分布是

$$I = I_1 + I_2 + 2A_1A_2 \cos(\varphi_1 - \varphi_2)$$

(1)

式中的 $I_1 = A_1^2$ 、 $I_2 = A_2^2$ ， A_1 、 A_2 是两列平面波的振幅， φ_1 、 φ_2 是对应的空间相位函数。当两束相干光的相位差为 2π 的整数倍时，即

$$\varphi_1 - \varphi_2 = 2n\pi \quad n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$$

(1) 式便描述了两束相干光干涉所形成的峰值强度面的轨迹，如图 1 所示。若能用记录介质将此干涉图样记录下来并经过适当处理，则就获得了一块全息光栅。

1. 全息光栅基本参数的控制

(1) 全息光栅空间频率（周期）的控制

如图 2 所示，波长为 λ 的 I、II 两束相干光与 P 平面法线的夹角分别为 θ_1 和 θ_2 ，它们之间的夹角为 $\theta = \theta_1 + \theta_2$ 。这两束相干的平行光相干叠加时所产生的干涉图样是平行等距的、明暗相间的直条纹，条纹的间距 d 可由下式决定：

$$d = \frac{\lambda}{\sin \theta_1 - \sin \theta_2} = \frac{1}{2 \sin \frac{1}{2}(\theta_1 + \theta_2) \cos \frac{1}{2}(\theta_1 - \theta_2)} \quad (2)$$

当两束对称入射, 即 $\theta_1 = \theta_2 = \theta/2$ 时

$$d = \frac{\lambda}{2 \sin \frac{\theta}{2}} \quad (3)$$

当 θ 很小时有

$$d = \lambda / \theta \quad (4)$$

若所制光栅的空间频率较低时, 两光束之间的夹角不大, 就可以根据 (4) 式估算光

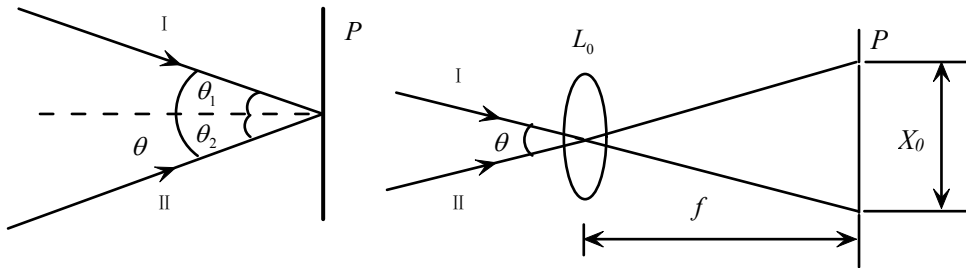


图 2 估测光栅空间频率的光路示意图

栅的空间频率。具体做法是: 把透镜 L_0 放在 I、II 两光束的重合区, 则两光束在透镜后焦面上会聚成两个亮点, 若两个亮点之间的距离为 X_0 , 透镜的焦距为 f , 则有

$$\theta = X_0 / f \quad (5)$$

将 (5) 带入 (4) 式得到

$$d = f \lambda / X_0 \quad (6)$$

即光栅的空间频率为

$$\nu = 1/d = X_0 / f \lambda$$

如图 2 所示, 将白屏 P 放在透镜 L 的后焦面上, 根据亮点的距离 X_0 估算光栅的空间频率 ν

$$X_0 = f \lambda \nu \quad (7)$$

(2) 全息光栅的槽形控制

由于全息光栅是通过记录相干光场的干涉图形而制成的, 因此, 其光栅的周期结构与两个因素有关: 干涉图样的本身周期结构; 记录干涉图样的条件。干涉图形是余弦条纹, 那么通过暴光所制得的光栅是否也具有余弦(正弦)型的周期结构呢? 回答是不一定的, 只有当记录过程是线性记录时, 即曝光底片变黑的程度与干涉图样的强度成正比时, 所制得的全息光栅才具有与干涉场相似的周期结构。

为了了解线性记录的含义, 下面简单介绍一下全息干板的感光特性。

照相干板的感光特性，通常是用黑度 D 与曝光量 $H\nu_0$ 的对数关系曲线来描述的，即 $D \sim \lg H\nu_0$ 曲线，或称作 $H-D$ [赫特 (Hurter) 德里菲尔德 (Driffield)] 曲线，如图 3

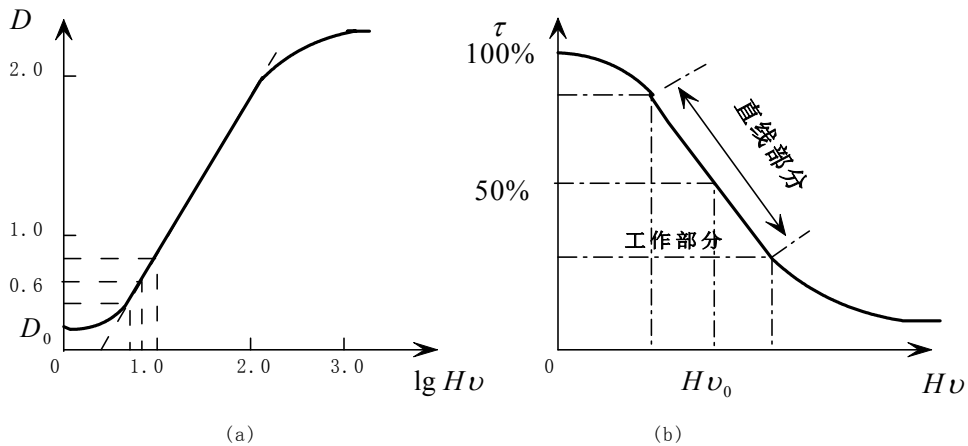


图 3 照像底片感光特性曲线

(a) 所示。但是在全息照相技术中，用干板的振幅透射率与曝光量的关系曲线 ($\tau \sim H\nu_0$ 曲线) 来描述干板的感光特性更为方便，如图 3(b) 所示。振幅透过率是出射光与入射光复振幅之比，曝光量是光强度 I 与曝光时间 t 的乘积。

因为 $\tau \sim H\nu_0$ 曲线只在中间一段近似为直线，所以有线性记录和非线性记录两种情况。记录时，调整两相干光的光强度比值在 $2:1 \sim 10:1$ 的范围内变化，若将曝光量控制在 $\tau \sim H\nu_0$ 曲线的直线范围内变化，这样记录的复振幅透射率就与入射光的光强度变化有线性关系。因此，称为线性记录。如果曝光量不在 $\tau \sim H\nu_0$ 曲线的直线范围内变化，则复振幅的透射率与入射光强度的变化就不存在线性关系。因此，称为非线性记录。

(3) 检查光栅的正弦性及其空间频率

几何光学方法：将制备的光栅直接置入激光细光束中，在远处屏上将得到其衍射图样，如图 4 所示。由于光栅至屏的距离远大于光栅间距，此衍射图样为夫琅和费衍射图样，亦即其频谱。根据光栅 G 至屏 P 的距离 l ，以及频谱中级两亮点之间的距离 d' ，则可计算出光栅的实际空间频率 ν' (为什么?)。显然

$$\nu' = d' / (2l\lambda) \quad (8)$$

将实验空间频率 ν' 与要求的空间频率 ν 相比较，并分析产生误差的原因。

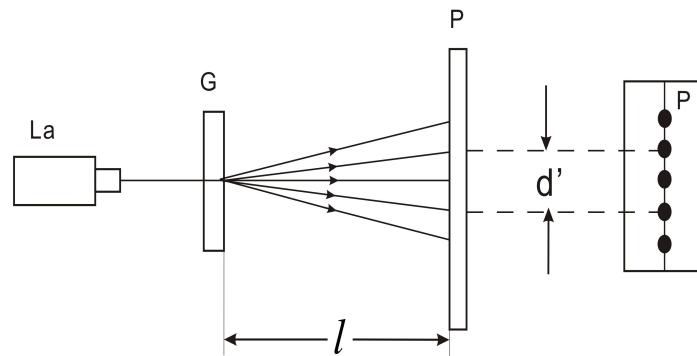


图 4 检测光栅特性参数光路

物理光学方法：用分光计测量本实验制作的光栅样品的空间频率 ν' 。可用汞灯作光源，利用绿色谱线测量。已知其波长为 $\lambda=546.1\text{nm}$ 。请自行设计测量方法和计算公式

【实验内容】

制作 $\nu = 200(300, 400)/mm$ 的全息光栅及特性测量

一、光路的设计与排布

1、设计：根据全息光栅的制作原理，自行设计制作一个空间频率为 $\nu = 200(300, 400)/mm$ 的全息光栅的实验光路。要求将光路图画在设计报告上，并说明设计思路。原则是：

- 1) 所有光束必须出自同一台激光器；
- 2) 充分利用全息防震平台的面积 $1.2m \times 0.8m$ ，光路的排布应以方便操作为宜；
- 3) 尽可能少用光学元件，
- 4) 选取合适的路径，使相干光束达到等光程。

2、光路的排布：根据所设计的光路图，在防震台上排布光路。请把光路排布中遇到的问题、解决的思路和办法写在实验报告中。

光路排布的原则是：

- 1) 各光学元件必须调到共轴，光束走向应相对于台面保持平行，以获得一致的偏振态，避免相干不完全；
- 2) 根据要求的光栅空间频率，计算两束相干光的夹角，并按照计算值排布光路；
- 3) 全息干板应与两光束对称放置；
- 4) 选取合适的分束镜分束比，以及合适的扩束镜倍数，以获得合适的光强比（光强比通常取 1: 1，以便获得较高的衍射效率）；
- 5) 所有夹持光学元件的支架必须保持稳定，不得有丝毫震动

二、记录一维全息光栅

利用排布好的光路，制作一块一维全息光栅。

注意：

- 1、本实验使用银盐干板；
- 2、选取合适的曝光时间 t_E ，
- 3、将银盐干板安装在干板架上，干板在干板架上被夹持应稳固不摇晃；
- 4、曝光前需静台两分钟，曝光过程中应保证全息防震台稳定，室内空气平稳，无大的气流运动；
- 5、银盐干板应严格避光操作，待定影结束后才可见白光。

【数据处理】

用几何光学和物理光学方法测出自制全息光栅的空间频率 ν' ，并与设计值比较之。

【误差分析】

分析全息光栅制作过程中的误差来源，提出改进的方法。

【注意事项】

1. 在任何情况下，不能使激光直接射入眼睛。注意安全
2. 按要求调整光路，正确使用磁力座
3. 光学元件表面不可任意触摸
4. 全息干板上不出现各种杂纹
5. 曝光前要稳定一分钟

6. 严格遵守暗室操作规程，守次序，不喧哗

【思考题】

1. 光栅的主要参数是什么？光栅常数取决于哪些条件？
2. 什么是空间相干性？在设计中怎样保证？
3. 光路设计的原则是什么？好的光路应具备那些要求？
4. 什么是低频光栅？什么是高频光栅？制作时的难度有何不同？
5. 怎样估算两束光的夹角？

附录 I 银盐干板的后处理

对曝光后的干板进行化学处理，应严格按常规的暗室操作规则进行，具体处理步骤如下：

- 1、在 D-19 显影液中显影，温度 20°C，时间 2 分钟左右；
- 2、清水中轻涮一遍；
- 3、用 F-5 定影液定影，时间 5-10 分钟；
- 4、流水冲洗 20 分钟以上；
- 5、自然晾干或吹干；
- 6、为了提高全息光栅的衍射效率，后处理过程可增加“漂白”过程，使全息光栅由振幅型转化为位相型，此过程可在 4、5 两步之间进行。

附录 II 平板剪切法检查光束的不平行度

若有一平晶，其表面完全平行，当一束光入射到平晶上时，由平晶第一表面和第二表面反射的光在重叠区域产生干涉条纹，如图 4 所示。干涉条纹的间距由

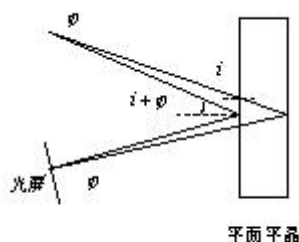


图 5

公式 $d = \frac{\lambda}{2 \sin \frac{\varphi}{2}}$ 决定。因 φ 角很小，故 $\varphi = \frac{\lambda}{d}$ 。若入射光束的不平行度 φ 愈小，则干涉条

纹的间距 d 愈大。当入射光为平行光时， $\varphi = 0$ ，则条纹间距 d 为无穷大，干涉场将一片明

亮。实际上干涉条纹间距为 50mm 左右时，光束的不平行度只有 2" 左右，这已是较理想的平行光波了。因此，当用一决平行平晶放置在待检验的光路上，并用屏接收由平晶两表面反射的光斑，此时可见到干涉条纹。然后改变光束的不平行度，使条纹间距增大，当屏上只有 1~2 个条纹后，入射光束已被调成平行光。

附录 III 复合光栅的制作

所谓复光栅是指在同一张全息干板上拍摄的两个栅线平行但空间频率不同的光栅。复合光栅采用两次曝光法制作，第一次拍摄空间频率为 ν_1 的光栅

$$\nu_1 = \frac{2d \sin \frac{\theta}{2}}{\lambda} \quad (9)$$

然后将全息干板 H 在水平方向旋转一个微小角度 φ 到 H_1 的位置 (如图 5), 在同一干板上进行第二次曝光, 则又得到另一空间频率为 ν_2 的光栅

$$\nu_2 = \frac{2d \sin \frac{\theta}{2}}{\lambda} \bullet \cos \varphi \quad (10)$$

如果两光栅的方向严格平行, 则复合光栅的莫尔条纹的空间频率 ν_t 是 ν_1 和 ν_2 的差额, 即

$$\nu_t = \Delta \nu = |\nu_1 - \nu_2| = \nu_1 (1 - \cos \varphi) \quad (11)$$

可由 ν_1 和 $\Delta \nu$ 来计算干板应转动的角度 φ 。

按照设计的 $\nu_1 = 100/mm$, $\nu_2 = 102/mm$, 利用式 (5) 算出 x_{01} , x_{02} 之值; 利用式 (11) 算出干板应转动的角度 φ 。利用图 2 光路制作空间频率为 ν_1 、 ν_2 设计值的复合光栅, 实验步骤自拟。

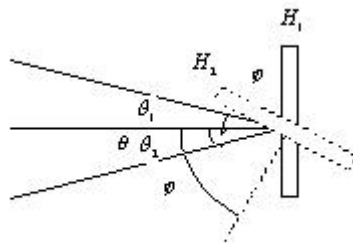


图 6