



大恒新纪元科技股份有限公司

光电研究所

中国·北京

电话(8610) 82782668

传真(8610)82782669

版权所有 不得翻印

全息光栅制作与光栅参数 测量实验

实验讲义

大恒新纪元科技股份有限公司

版权所有 不得翻印

实验一 全息光栅的制作

一、引言

光栅是一种重要的分光元件,在实际中被广泛应用。许多光学元件,例如单色仪、摄谱仪、光谱仪等都用光栅作分光元件;与刻划光栅相比,全息光栅具有杂散光少、分辨率高、适用光谱范围宽、有效孔径大、生产效率高,成本低廉等突出优点。

二、实验目的

- 1、了解全息光栅的原理;
- 2、复习用马赫-曾德干涉仪搭光路并拍照;
- 3、学习对全息光栅的后处理。

三、基本原理

(一) 全息光栅

当参考光波和物光波都是点光源且与全息干板对称放置时可以在干板上形成平行直条纹图形,这便是全息光栅。采用线性曝光可以得到正弦振幅型全息光栅。从光的波动性出发,以光自身的干涉进行成像,并且利用全息照相的办法成像制作全息光栅,这是本节的内容。

(二) 光栅制作原理与光栅频率的控制

用全息方法制作光栅,实际上就是拍摄一张相干的两束平行光波产生的干涉条纹的照相底片,如图1所示,当波长为 λ 的两束平行光以夹角 θ 交迭时,在其干涉场中放置一块全息干版H,经曝光、显影、定影、漂白等处理,就得到一块全息光栅。相邻干涉条纹之间的距离即为光栅的空间周期 d (实验中常称为光栅常数)。

有多种光路可以制作全息光栅。其共同特点是①将入射细光束分束后形成两个点光源,经准直后形成两束平面波;②采用对称光路,可方便地得到等光程。我们常采用马赫-曾德干涉仪光路,如图2所示。

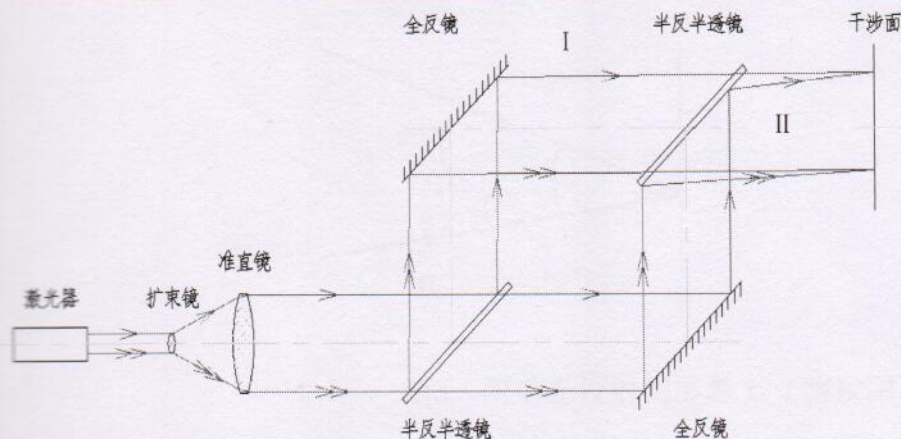


图2 全息光栅制作实验光路图

它是由两块分束镜（半反半透镜）和两块全反射镜组成，四个反射面接近互相平行，中心光路构成一个平行四边形。从激光器出射的光束经过扩束镜及准直镜，形成一束宽度合适的平行光束。这束平行光射入分束板之后分为两束。一束由分束板反射后达反射镜，经过其再次反射并透过另一个分束镜，这是第一束光；另一束透过分束镜，经反射镜及分束镜两次反射后射出，这是第二束光。在最后一块分束镜前方两束光的重叠区域放上屏P。若 I，II 两束光严格平行，则在屏幕不出现干涉条纹；若两束光在水平方向有一个交角，那么在屏幕的竖直方向出现干涉条纹，而且两束光交角越大，干涉条纹越密。当条纹太密时，必须用显微镜才能观察得到。在屏平面所在处放上全息感光干版，记录下干涉条纹，这就是一块全息光栅。

为了保证干涉条纹质量，光束 I 和 II 需要严格水平于光学平台，可在图中最后一个分束镜后面两束光的重叠区内放一透镜，将屏移到透镜的后焦面。细调两块反射镜使光束 I 和 II 在屏上的像点处于同一水平线上，这样 I、II 严格水平于平台。

然后，可转动两块反射镜或最后一块分束镜使两个像点重合。这时光束 I 和光束 II 处于重合状态，会聚角 $\omega = 0$ ，应没有干涉条纹。撤去透镜后，微调两块反射镜或最后一块分束镜的水平调节旋钮，改变 I、II 的会聚角使其不为零，就可在光束 I 和 II 的重叠区看到较明显的干涉条纹。

准确的控制光栅常数（即光栅的空间频率），是光栅质量的重要指标之一。我们采用透镜成像的方法来控制制作的光栅的空间频率：

如果上图中经最后一块分束镜射出的两相干光束 I、II 与 P 面水平法线的交角不相等，分别为 θ_1 和 θ_2 ， $\omega = \theta_1 + \theta_2$ 称为两束光的会聚角，如图3中所示，

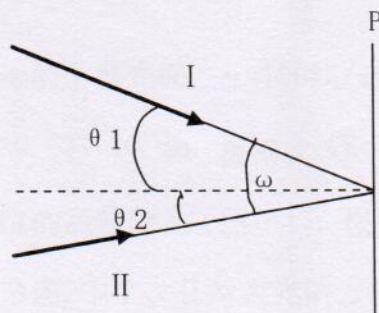


图3 两束光投射到屏幕上（俯视图）

则由杨氏干涉实验的计算得到两束光在P面形成的干涉条纹的间距为：

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

式中 λ 为激光束的波长，对于 He-Ne 激光器 $\lambda = 6328 \text{ \AA}$ 。当 $\theta_1 = \theta_2$ 而且 $(\theta_1 + \theta_2)/2 \ll 1$ 时，近似有：

$$d \approx \frac{\lambda}{\omega} \quad (1-2)$$

在本实验中，由于两束光的会聚角 ω 不大，因此可以根据上式估算光栅的空间频率。具体办法是：把透镜 L 放在图 1-2 中两束光 I、II 的重叠区，如图 4 所示。

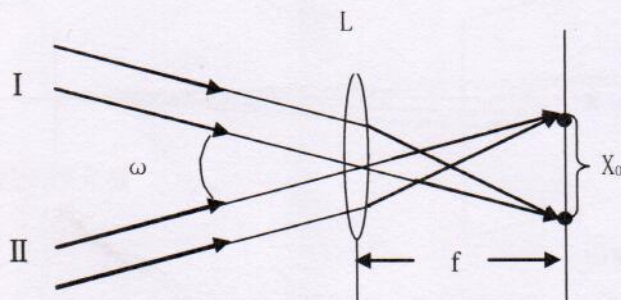


图 4 用透镜估算两束光的会聚角（俯视图）

在 L 的焦面上两束光会聚成两个亮点。若两个亮点的间距为 x_0 ，透镜 L 的焦距为 f ，则有 $\omega \approx x_0/f$ 。由此式和式 (1-2) 可得： $d \approx f\lambda/x_0$ 。

从而所得到的正弦光栅的空间频率为：

$$v = \frac{1}{d} = \frac{x_0}{f\lambda} \quad (1-3)$$

根据式 (1-3)，按需要制作的全息光栅对空间频率的要求，调整图2中两光束 I、II 的方

向，使之有合适的夹角。

例如要拍摄100线/mm的全息光栅， $\nu=100$ 线/mm，本实验所配备的透镜 L_1 的焦距 $f=150$ mm，氦氖激光器激光波长 $\lambda=0.63\times 10^{-3}$ mm，根据式(2-3)， $x_0=\lambda f \nu=0.63\times 10^{-3}\times 150\times 100=9.5$ mm

实验时把屏幕放在 L_1 的后焦面上(图1-4)，根据两个亮点的间距，即可判断光栅的空间频率是否达到要求。可调节图2中I、II两束光的方向，一直到 $x_0=19$ mm为止。

由式(1-1)，并参照图2和图3，在实验中改变I、II两束光的方向从而改变光栅空间频率的途径有两种。一种是绕铅垂方向略微转光路中的任一块反射镜或最后一块分束镜，从而改变 θ_2 ，使得干涉条纹的间距 d 改变；另一种是绕铅垂方向旋转干版P，这时在保持 $\omega=\theta_1+\theta_2$ 不变的条件下将使 $\theta_1-\theta_2$ 改变，从而改变了 d ，也即改变了空间频率 ν 。在本实验中，因干版架无旋转微调装置，所以采用第一种办法。

以上方法制作的是最简单的一维光栅，以下是其观察示意图：

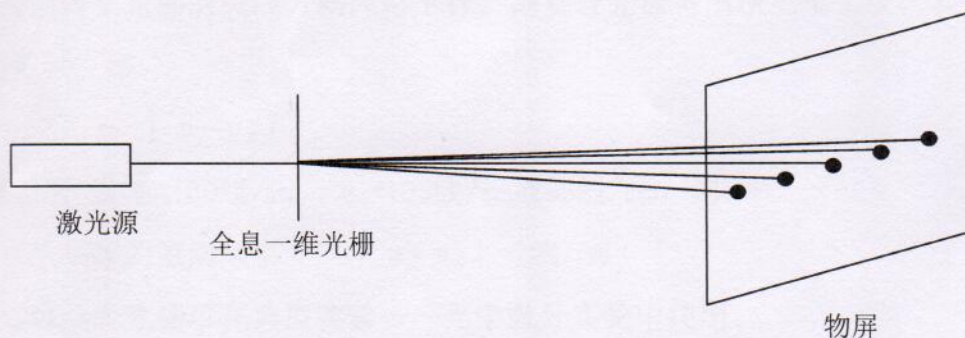


图5 一维光栅的观察

(二) 正交光栅：

如果以上的一维光栅制作成功，那么二维光栅只需要对干版进行两次曝光就行了。这两次曝光分别是让干版水平放置和垂直放置，

所用光路及拍摄方法与全息光栅基本相同，仍然是在马赫-曾德干涉仪上拍制。只是曝光一次后，将全息干版旋转 90° 再曝光一次，这样就使两个相互垂直的光栅拍在一块干版上，这就是正交光栅。

正交光栅的观察：

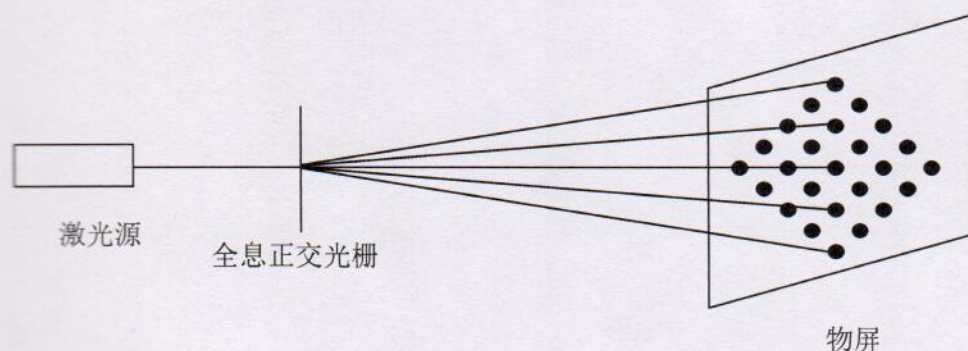


图6正交光栅的观察

（三）复合光栅：（选做）

复合光栅是用全息方法在同一干板上拍摄到的两个栅线平行但空间频率稍有差别的光栅，采用二次暴光法来制作。

第一次暴光拍摄空间频率为 ν 的光栅，然后保持光栅栅线方向，仅改变光栅的空间频率，在同一张全息干版上进行第二次暴光，拍摄空间频率为 ν_0 的光栅。

如果两个光栅的栅线方向严格平行，则复合光栅将出现莫尔条纹，其空间频率 ν^1 是 ν 和 ν_0 的差频，即：

$$\nu^1 = \Delta \nu = | \nu - \nu_0 |$$

例如，若 $\nu = 100$ 线/mm， $\nu_0 = 102$ 线/mm 或 98 线/mm，则：

$$\text{莫尔条纹的空间频率 } \nu^1 = | \nu - \nu_0 | = 2 \text{ 线/mm}$$

这种复合光栅可在典型实验——光学微分实验中使用。

本实验中复合光栅仍然可以在马赫-曾德干涉仪上拍制的。具体方法是先拍一个 100 线/mm 的光栅，然后保持干版不动，移动任何一个反射镜或最后一个分束镜在水平方向的转角，如果用本实验系统提供的燕尾平移台的话大致是转动 5 个最小刻度。

4、实验内容

- 1、 调节马赫-曾德干涉仪光路光路，调出干涉条纹，在分束镜后加上透镜和白屏。

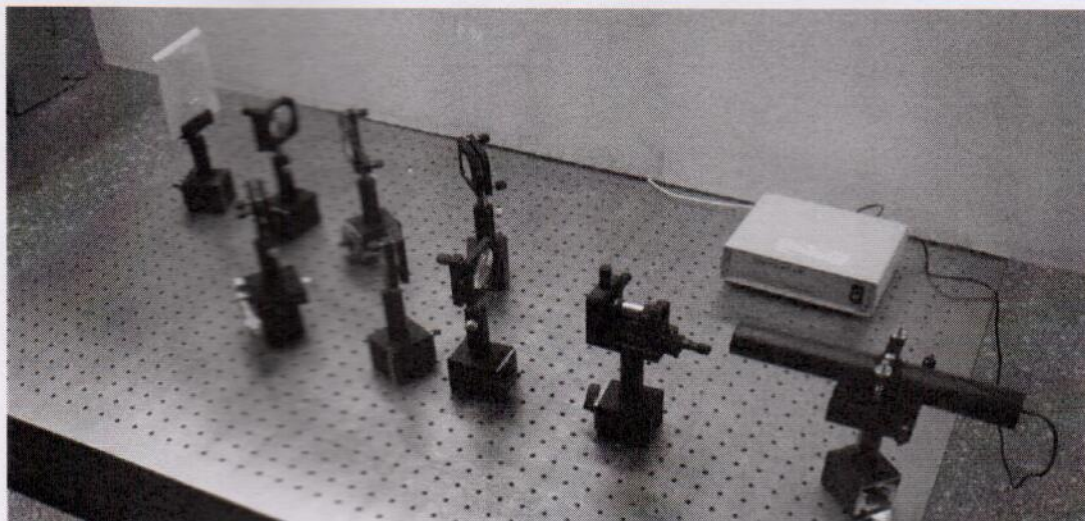


图7 全息光栅制作实物图

2、拍摄全息光栅：

调妥后挡住激光束,放置全息干版,静置1~2min后曝光,20线/mm,100线/mm各拍摄一块

3、拍摄正交光栅：

调妥后挡住激光束,放置全息干版,静置1~2min后曝光,20线/mm,100线/mm各拍摄一块

4、拍摄复合光栅：(选做)

拍摄一块 $\nu=100$ 线/mm, $\nu_0=102$ 线/mm两种空间频率的复合光栅

5、后处理：

显影、清水冲洗、定影、清水冲洗、漂白、烘干。

6、对制作的光栅进行观察。

实验二 光栅参数特性研究

一、引言

光栅是一种常用的光学色散元件，它是能够在一定的空间范围内，具有空间周期性分布，并能按一定规律对电磁波进行振幅调制或（和）位相调制的物体或装置。

两束相干平行光成一定角度时，在两束光相交区域将形成干涉条纹。用全息干板将干涉条纹拍摄下来便是全息光栅。全息光栅的制作的原理简单，操作方便，所用光路很灵活，利用迈克耳逊干涉仪、马赫—曾德干涉仪、菲涅耳双面镜、Sagnac 干涉仪等能形成两束相干平行光的光路都可制作全息光栅。全息光栅不但可以代替一般光栅用于教学实验，而且可以根据某些实验的特殊要求，例如光学微分、图像相减等，来制作各种空间频率的全息光栅，全息正交光栅、全息复合光栅等^[1]。

二、实验目的

1. 了解全息光栅的基本原理
2. 了解光栅的主要特性
3. 用光栅测光波波长

三、基本原理

（一）光栅的基本特性

由于光栅在结构上具有空间周期性，好似一块由大量等宽、等间距并相互平行的细狭缝（或刻痕）组成的衍射屏，因此，光栅的基本原理和多缝衍射原理相似。

在图 1 中，S 为一缝光源，它处于透镜 L_1 的焦平面上，如果 L_1 的主轴正好通过狭缝的中心线并相互平行，则缝光源通过 L_1 后输出平行光。G 为光栅，它具有 N 条宽度为 a 的透射缝，相邻狭缝间的不透光部分的宽度为 b 。自 L_1 出射的平行光垂直地照射到光栅 G 上，透镜 L_2 将与光栅法线方向成 θ 角的衍射光，会聚于 L_2 焦平面 F 的 P 处。在 P 处产生亮条纹的条件是：

$$d \sin \theta = k \lambda \quad \text{-----} (1)$$

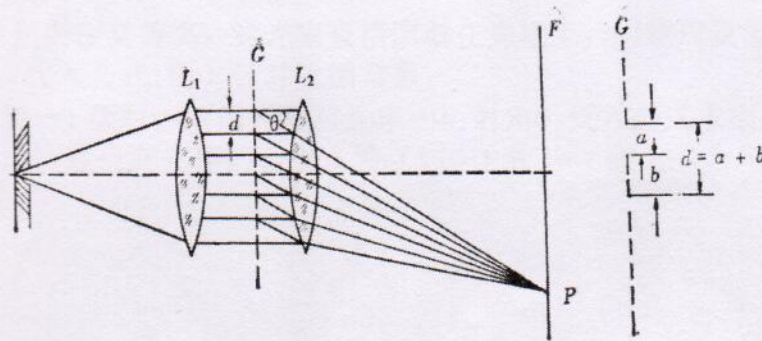


图 1

这就是我们通常所说的光栅方程。式中， θ 为衍射角， λ 是所用光源的波长， k 是光谱的级次 ($k=0, \pm 1, \pm 2, \dots$)， $d=a+b$ ，是光栅常数。衍射角 $\theta=0$ 时，级次 $k=0$ ，任何波长都满足在该处为极大的条件，所以， $\theta=0$ 处出现中央亮条纹。对于 k 的其他数值，符号“ \pm ”表示两组光谱，由中央亮条纹向左右对称地分布。当已知所用光源的波长 λ ，测出与某一级次 k 值对应的 θ 角后，就可由 (1) 式求出光栅常数 d 。同样，已知 d ，测出 k 级的衍射角 θ 后，亦可求得相应的波长 $\lambda = d \sin \theta / k$ 。

若自 L_1 出射的平行光不与光栅表面垂直时，光栅方程式应写成^[3]：

$$d(\sin \theta - \sin i) = k \lambda \quad (k=0, \pm 1, \pm 2, \dots) \quad \text{-----} (2)$$



式中 i 为入射光与光栅法线的夹角。所以在利用 (1) 式时，一定要保证平行光垂直入射，否则必须利用 (2) 式。

除了光栅常数外，分辨本领、角色散率和衍射效率也是描述光栅特性的三个重要参数。分辨本领 R 的定义为：

$$R = \frac{\lambda}{\Delta\lambda}, \quad (3)$$

其中， λ 为谱线的平均波长， $\Delta\lambda$ 为刚好可分辨的两条谱线的波长差。由瑞利判据可以证明：

$$R = kN = k \frac{l}{d}, \quad (4)$$

式中， k 为级次， N 为光栅上受到光波照明的透缝总数， l 为受光面的宽度， d 为光栅常数。由 (4) 式可知：光栅在使用面积(宽度一定的)一定的情况下，使用面积内的刻线数目越多，分辨率越高；对有一定光栅常数的光栅，有效的使用面积越大，刻线数目越多谱线越细锐，分辨率越高；高级数比低级数的光谱有较高的分辨本领。由于通常所用光栅的光谱级数不高，所以光栅的分辨本领主要取决于有效的使用面积内的刻线数目 N 。

光栅的角色散率 D 的定义为

$$D = \frac{\Delta\theta}{\Delta\lambda}, \quad (5)$$

$\Delta\theta$ 为刚能分辨的两条谱线的衍射角之差，也就是说，角色散率等于单位波长间隔内两个刚可分辨的单色谱线间的角间距。对 (1) 式两边取微分，便可得到

$$D = \frac{k}{d \cos\theta} \quad (6)$$

此式表明，除了波长(表现在衍射角 θ 的大小上)的影响外，级次越高， d 越小(即单位宽度的光栅上透光缝的条数越多)，角色散率 D 越大。

五. 实验内容

(1) 测定光栅常数

用光阑调整激光束使其等高。激光束直接照射在光栅上，用卷尺量出相关距离，测出 +1 和 -1 级的衍射角，代入公式 (1) 计算光栅常数；

(2) 在 $k=+1$ 和 -1 级时，测出光栅对光束的衍射角，代入公式求出激光的波长；

(3) 根据公式，计算已有光栅的分辨本领(如 +1 和 -1 级)。

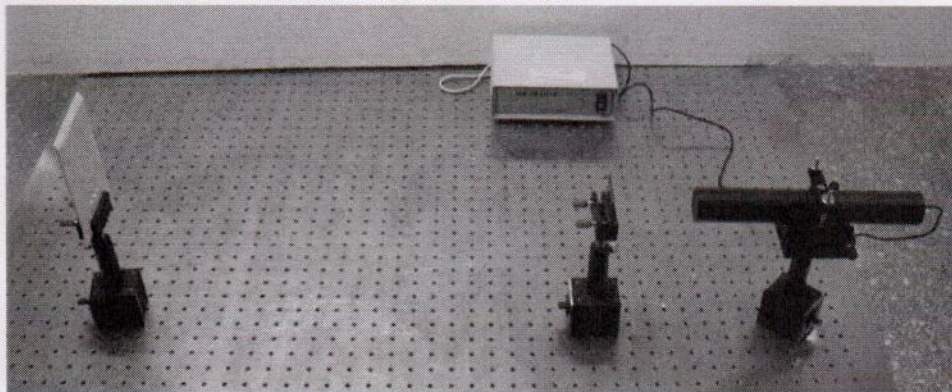


图2 光栅参数实物图