

# 采用全息光栅作分束器的斜入射干涉仪

曹明\* 王雅黎 刘瑞祥

(中国科学院长春光学精密机械研究所, 应用光学国家重点实验室)

## 提 要

本文探讨了一种用全息透射式衍射光栅作分束器的斜入射干涉方法和装置, 该装置主要用于非光学表面的粗糙度检测, 整个装置结构简单, 易于配置且具有很好的稳定性。

关键词: 斜入射干涉仪; 表面粗糙度。

## 一、引 言

光学干涉法应用于检测非光学表面时遇到了困难, 其原因是垂直入射时这些表面的镜向反射率非常低, 以至无法得到可供判读的清晰干涉图。但当光束以近掠射的大倾角入射时, 可大幅度地提高表面的镜面反射率, 这就解决了干涉法检测非光学表面所遇到的主要困难。

著名的 Lloyd 镜实验可看成是斜入射干涉法的最初雏型<sup>[1]</sup>。近二十年来出现了各种斜入射干涉检测装置, 大体上可归为两类, 即棱镜斜入射干涉仪<sup>[2]</sup>和光栅斜入射干涉仪<sup>[3]</sup>。利用斜入射法作表面粗糙度的干涉检测具有很多优点: (1) 可检测反射率很低的非光学表面, 如毛玻璃表面或未经精磨抛光的各种金属表面等; (2) 用较小的入射波面可检测大面积的表面; (3) 仪器的检测灵敏度(每改变干涉条纹一个级次其对应的表面起伏量)可调, 它给干涉图的判读分析带来很大的方便。人们可以根据对表面测量精度的不同要求选择相应的检测灵敏度。

本文首先根据实验结果分析了非光学表面镜面反射率随照明光入射角的变化趋势, 在此基础上探讨了一种采用全息光栅作为分束器的斜入射干涉方法及装置, 并利用这一装置实际检测了多种非光学表面, 在一定实验条件下均得到了条纹对比度很好的表面干涉图。干涉仪的检测灵敏度为  $p/2$  ( $p$  是光栅常数)。文章最后提出了提高干涉图条纹对比度的几种方法。

## 二、非光学面镜向反射率与入射角的相关性

按图 1 所示装置实际测量了全息干板乳剂面及一组分别由铣、刨、车加工的金属铝

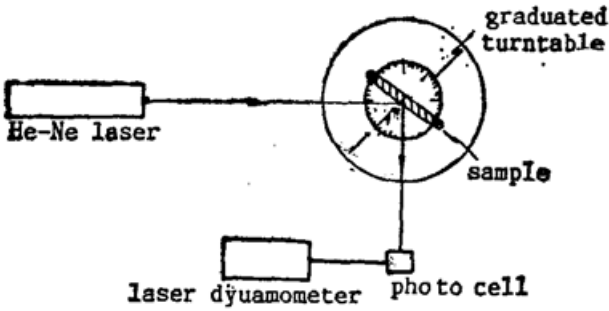


Fig. 1 Specular reflectance measurement

(LY12)、铜(H62)和钢(45)样板的镜向反射率\*, 得到一组反射率随照明光入射角变化的关系曲线。如图2所示。由图2可看出, 表面的镜向反射率随入射角的变化趋势大致相仿, 即随入射角的增大而递增, 当入射角增至 $80^{\circ} \sim 90^{\circ}$ 之间时反射率发生急剧变化。

在测量机械加工的金属表面时, 发现其镜向反射率在递增的同时还伴有周期性的起伏现象, 这是由于机械加工表面所具有类光栅结构引起的, 若反射面为理想的正弦型

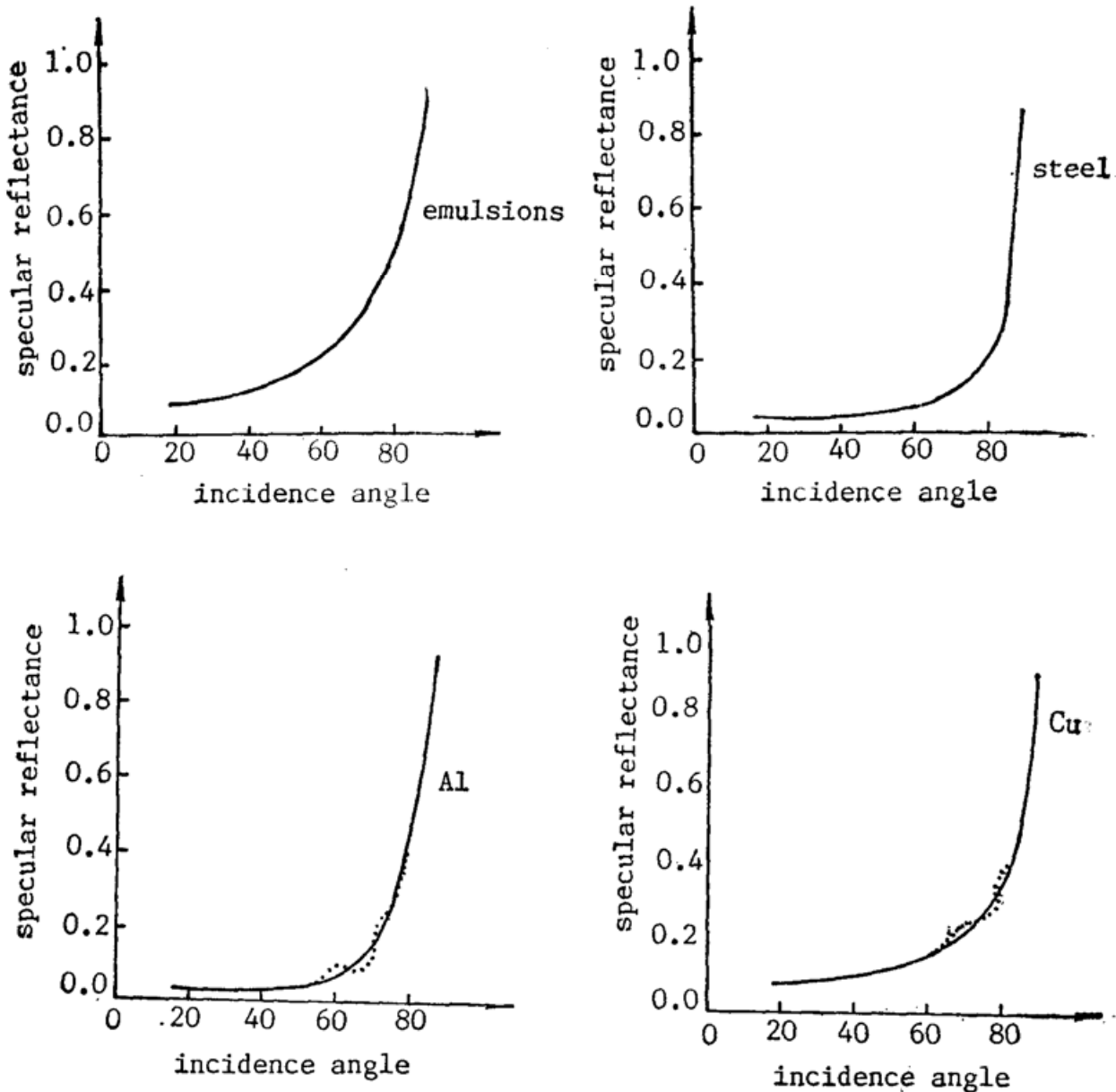


Fig. 2 Specular reflectance of different samples

(Solid Line & dotted line respectively represent change tendency and practical measure)

\* 对样板反射率的测量仅测了电矢量垂直于入射面的分量  $E_z$ , 而在本文所讨论的范围内, 我们也仅对  $E_z$  分量感兴趣。

光栅, 则其衍射光为一组一维分布的爱里(Airy)斑, 峰值强度取决于 $[J_n(A)]^2$ , 这里 $J_n$ 是第一类贝塞耳函数,  $A \sim \cos \theta$ ,  $\theta$ 为入射角<sup>[4]</sup>。图3所示为表面镜向反射光强(相当于零级衍射光强 $[J_0(A)]^2$ )随入射角变化的关系曲线, 这里假设理想光栅表面的起伏量为 $1 \mu\text{m}$ , 光栅常数为 $0.1 \text{ mm}$ 。

上述结果虽是由理想的正弦型光栅推导出的, 但其结论具有一定的普遍性, 凡是具有类光栅结构的表面均存在上述现象。

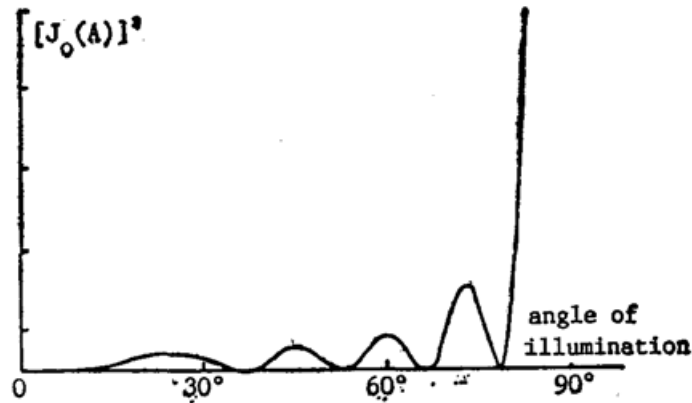


Fig. 3 Dependence of the specular reflection intensity on incident angle

### 三、基本原理

图4为采用全息透射式衍射光栅作分束器的斜入射干涉仪原理简图。由前述对表面镜向反射率的测量结果知, 物光的入射角选 $80^\circ \sim 85^\circ$ 较为合适, 实验中选择了 $220 \text{ l/mm}$ 的光栅, 对应入射角为 $82^\circ$ 。

平面波 $W$ 垂直入射到第一块光栅分束器上, 其零级衍射光直接到达第二块光栅; 一级衍射光斜入射到被检表面, 反射后与零级光在第二块光栅处相汇; 经第二块光栅衍射的任意两束同向传输的光均可发生干涉。图4所选的是参考光经光栅2衍射的一级光和物光的零级光。

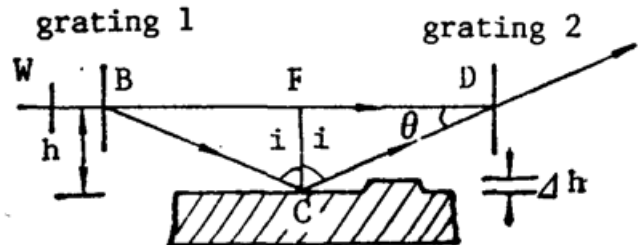


Fig. 4 Schematic for the principle of an oblique incidence interferometer using holographic gratings as beam-splitter

4 所选的是参考光经光栅2衍射的一级光和物光的零级光。

对一平行于参考光束且垂直于光栅表面放置的理想平面, 观察面上将是一片均匀照明。由图4可见, 由 $B$ 点至 $D$ 点两束相干光的程差为

$$OPD = (BC + CD) - (BF + FD) = 2h(1 - \sin \theta) \sec \theta. \quad (1)$$

若被检面某处有一微小起伏 $\Delta h$ 如图4所示, 则对应于这部分的光程差改变量为 $2\Delta h(\cos \theta)$ , 干涉级次的变化为

$$\Delta N = 2\Delta h(\cos \theta) / \lambda_0. \quad (2)$$

如用光栅常数为 $p$ 的光栅作分束器, 则有

$$\lambda = p \sin \theta. \quad (3)$$

由图4可知,



$$\theta = 90^\circ - i, \quad \sin \theta = \cos i. \quad (4)$$

将(3)、(4)式代入(2)式可得

$$\Delta N = 2\Delta h/p. \quad (5)$$

(5)式表明,被检平面的起伏量为光栅常数的一半时,对应于干涉条纹级次改变1,即干涉仪的检测灵敏度为 $p/2$ 。由此也可看出,装置的检测灵敏度不象普通菲佐(Fizeau)干涉仪那样由照明光波长决定,而是由所选用的光栅常数决定。这就使检测者可以很方便地选择不同的检测灵敏度以检测不同粗糙度的表面。

#### 四、实验结果

利用上述装置实际检测了一组非光学表面,包括全息干板乳剂面,毛玻璃表面和多种金属表面。在一定的实验条件下均得到了条纹对比度很好的干涉图。在图5所示的干涉图中除玻璃表面外均无法用普通的垂直入射干涉仪检测。可见斜入射干涉仪在非光学面的干涉法检测中具有其独特的优势。

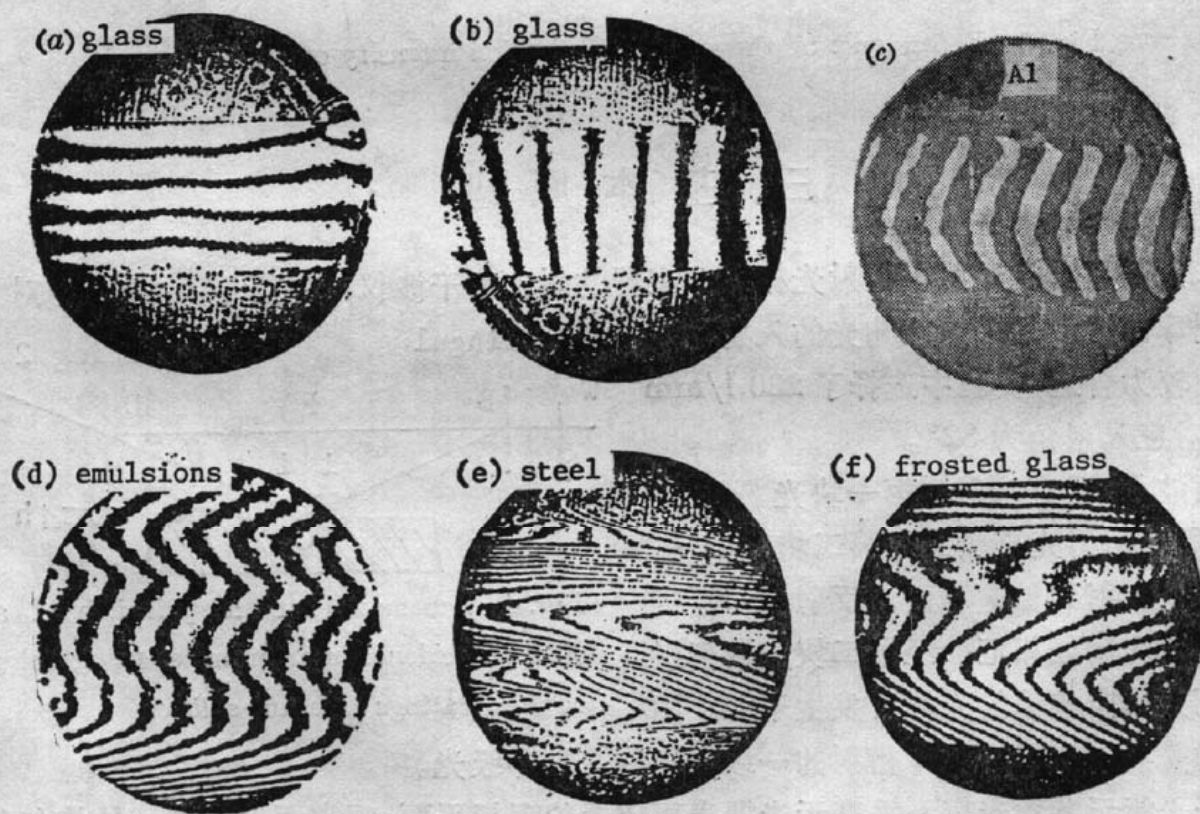


Fig. 5 Interferograms of same surface

由于斜入射干涉仪所处理的对象大多是非常粗糙的表面,故其干涉图不必象一般光学平面的干涉图那样去处理,定性的判读就足够了。例如图中的钢板表面和毛玻璃面,从干涉条纹的弯曲程度很容易就可估算出表面的起伏量。在需要对干涉图作出精细判读的情况下,可采用条纹法技术对其进行判读以达到较高的精度。表1列出了利用美国 Zygo 公司的 Mark III 型数字波面干涉仪进行判读所得到的结果。该检测装置结构简单,易于配置,调好后具有很好的稳定性。

Table 1 The results of identification for interferogram

No.	detected surface	peak-valley	R.M.S (p)	sampling point No.
a	glass surface	0.809	0.098	78
b	glass surface	0.806	0.161	66
c	Al plate (76)	1.147	0.324	87
d	emulsions surface	1.549	0.359	109

Note: units of peak-valley and R. M. S is  $p=4.5 \mu\text{m}$

## 五、条纹对比度分析

干涉图条纹对比度的好坏直接决定了干涉仪可检测的表面范围, 因此如何提高干涉图的条纹对比度是干涉仪设计过程中一个不可忽视的环节。文献[3]中 Birch 以增大物光的入射角(即选用光栅常数较大的光栅作分束器)来提高干涉条纹的对比度, 但其结果将导致仪器的检测灵敏度下降。在大多数情况下, 我们总是希望仪器能有尽可能高的检测精度, 因此应考虑采用其它方法来改善条纹对比度。

双光束干涉仪中的条纹对比度取决于两干涉光束的相对强度, 在如上介绍的斜入射干涉仪中, 条纹对比度可由下式表示成

$$V = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} = \frac{2A_1A_2}{A_1^2 + A_2^2} = \frac{2\sqrt{R}}{1+R} \quad (5)$$

式中  $R$  为被检表面的镜向反射率。(5)式中假定两块光栅具有相同的衍射效率。若衍射效率不同, 则经简单的数学推导可得在图 4 所示情况下的干涉条纹对比度为

$$V = \frac{2\sqrt{R\eta_{10}\eta_{21}\eta_{11}\eta_{20}}}{\eta_{10}\eta_{21} + \eta_{11}\eta_{20}R} \quad (6)$$

式中  $\eta_{ij}$  为第  $i$  块光栅的  $j$  极光强度衍射效率。与(5)式比较, 可见这里增加了一个控制参量  $\eta_{ij}$ , 显然当  $\eta_{10}\eta_{21} = \eta_{11}\eta_{20}R$  时有最佳条纹对比度。

由上面的结果可知, 当  $R$  值很小时, 可通过选用不同衍射效率的光栅分别作干涉仪的两个分束器来改善干涉图的条纹对比度。具体地说, 即第一块分束器选用高衍射效率的光栅而第二块分束器则用衍射效率相对较低的光栅。与此原理相同的另一更为简单的方法是选用相同光栅的不同衍射级次的光进行干涉。在实际检测中可根据具体情况选用上述方法

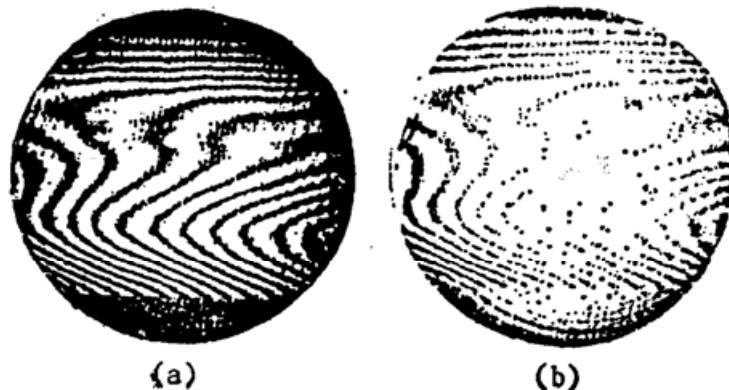


Fig. 6 Comparison of the visibility by a choice of different diffraction orders



中的一种或两种方法同时采用。

图 6 所示为不同实验条件下摄得的毛玻璃表面的干涉图。干涉仪中第一块光栅的零级和  $\pm 1$  级衍射效率均为 16.5%，第二块光栅的零级衍射效率为 34.3%， $\pm 1$  级衍射效率为 11.7%。图 6 中的 (a)、(b) 显示了用第一块光栅的零级光作参考光，1 级光作物光，分别由第二块光栅的 1 级和零级、零级和 -1 级衍射光进行干涉所摄得的干涉图，其清晰程度具有明显的差别。

## 六、结 论

综上所述，采用全息光栅作分束器的斜入射干涉仪非常适合于对非光学表面粗糙度的干涉法无损检测。本文所介绍的斜入射干涉检测装置结构简单，作为干涉仪主要部件的全息衍射光栅也很容易制备。整个装置易于配制，且具有很好的稳定性。

## 参 考 文 献

- [1] P. H. Langenbeck; *Appl. Opt.*, 1967, **6**, No. 10 (Oct), 1707~1714.
- [2] N. Abramson; *Optik*, 1969, **30**, No. 1 (Oct), 56~71.
- [3] K. G. Birch; *Nation Physical Laboratory U K, report MON 4* March.
- [4] K. J. Allardyce, N. George; *Appl. Opt.*, 1987, **26**, No. 12 (15 Jun), 2364~2375.

## Oblique-incidence interferometer using holographic gratings as beam-splitter

CAO MING\*, WANG YALI AND LIU RUIXIANG

(Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica)

(Received 7 August 1989; revised 8 May 1990)

### Abstract

A grazing interferometry, using holographic diffraction gratings as beam-splitter, for measuring the flatness of non-optical surfaces is described. The interferometer is relatively easy to set up and stable once aligned.

**Key words:** oblique incidence interferometer; roughness of surface.

---

\* New address: Metrological college of China, Hangzhou.