

JQY-300 型激光全息干涉仪

王 文 桂

(中国科学院上海光学精密机械研究所)

提 要

JQY-300 型激光全息干涉仪是一种利用二次曝光全息差分干涉法测量大尺寸光学玻璃均匀性的仪器。仪器的测量精度为 $\pm 5 \times 10^{-7}$ 。本仪器结构设计的特点是：采用泡沫橡胶防震垫，使防震结构简单，能隔离 8~9 赫的震动；采用将样品座放置在工作台的支承点的办法，消除工作台承受大样品时变形所引入的光程差；样品座是将通常应用“点、线、面”的定位机构，改成三维角度微调机构，使加工简单、装调方便，满足精度要求。

一、仪器光学系统

仪器的外形结构如图 1 所示。本仪器能测量的样品最大尺寸为 $\phi 300 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$ ，重 40 kg。

仪器采用自准直光学系统进行差分干涉，以二次曝光获得全息干涉图^[1~4]。光学系统布置如图 2 所示。

分束器 5 将光束分成参考光束和物光束。前者经反射镜 6, 7 反射和扩束器 8 扩束后，再由反射镜 10 反射到全息底片 11 上。后者经反射镜 12 反射，由 13 和 14 所组成的扩束器扩束后，通过被测样品，然后由反射镜 16 沿原路反射，并经反射镜 17 反射到全息底片上。

再现全息图象时，将反射镜 3 移入光路，并经扩束器 19 扩束后照明全息干涉图片 20，由摄像器 21 将全息图象记录下来。

激光器的后向光束和部分反射镜 17 所反射的无用光束，在仪器中将会形成有害的杂散光，我们采用锥形碳斗将其吸收。其它较弱的杂散光采用喷涂黑色消光漆，将其吸收。

为了使到达全息底片上的参考光束和物光束的光强基本相等，作者对各光学部件作了分析和计算。

1. 参考光束和物光束光强分配的考虑

由于两路光程基本相等，两路光束所通过的镜片数也基本相等，因此光源发射光束的方向性所形成的发散损失，以及光束在传递过程中的吸收和散射损失可视为相等，并都以损失系数 K 表示。设 I 为光源强度； R 为分束器 5 的反射率； r' 为全反射镜的反射率； τ 为折射表面的透射系数； n 及 n_1 分别为参考光路和物光路中全反射镜的数目； m 及 m_1 分别为参

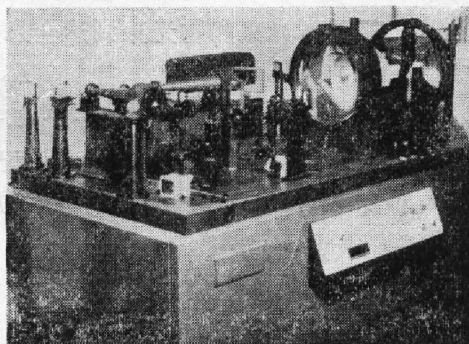


图 1 仪器外貌(去罩)

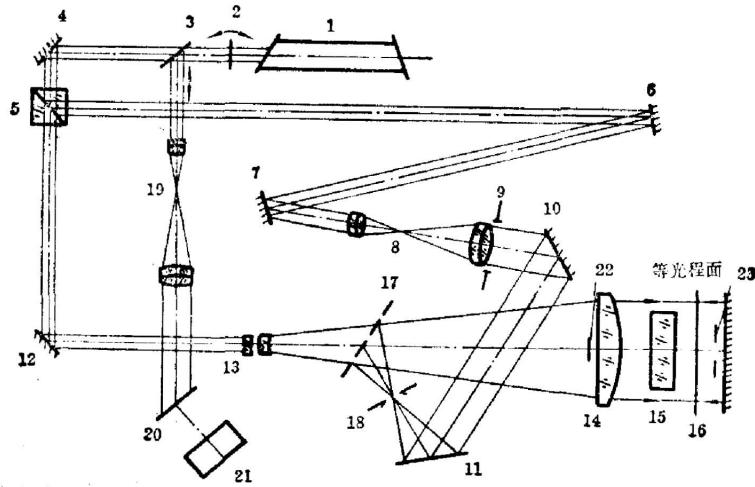


图2 光学系统布置简图

1—光源(氩-氟激光器); 2—开关; 3, 4, 7, 10, 12—全反射镜; 5—立体式直角棱镜分束器; 6, 16, 17—部分反射镜; 8, 19—扩束器; 9, 13—光阑; 11—全息底片; 13和14—自准直扩束系统; 15—被测样品; 20—全息干涉图片; 21—摄像器; 22和23—配偶带状光阑

考光路和物光路中折射面的数目; r_1 为部分反射镜 17 的反射率, r_2 为部分反射镜 16 的反射率。则参考光束和物光束到达全息底片上的光强分别为 I_R 和 I_{Ob}

$$I_R = K \cdot I \cdot R \cdot r'^n \cdot \tau^m, \tag{1}$$

$$I_{Ob} = K \cdot I \cdot (1 - R) \cdot r'^{m_1} \cdot \tau^{m_1} \cdot (1 - r_1) \cdot r_1 \cdot r_2, \tag{2}$$

2. 部分反射镜 16 的反射率分配值的考虑

取图 2 中样品 15 和部分反射镜 16 的光路图示于图 3。设入射到样品上的物光束光强为 I_0 , 经样品表面 1 反射, 其反射率为 r , 则反射光强为:

$$I'_0 = r \cdot I_0. \tag{3}$$

I_0 经样品透射, 部分反射镜 16 沿原路反射, 再经样品透射后的光强为

$$I''_0 = I_0 \cdot (1 - r)^4 \cdot (1 - \alpha)^2 \cdot r_2, \tag{4}$$

式中 α 为样品的吸收系数。使 $I'_0 = I''_0$, 则

$$(1 - r)^4 (1 - \alpha)^2 \cdot r_2 = r. \tag{5}$$

通常取 $r = 0.04$, $\alpha = 0.01$, 代入(5)式得 $r_2 = 0.048$ 。

考虑到镀膜工艺的困难以及为了使全息干涉图的光强对比度较好, 故取 $r_2 = 0.1$ 。

3. 部分反射镜 17 的反射率分配值的考虑

部分反射镜 17 的反射率分配值选择原则是使通过它的透射光强和由其反射的光强, 在全息底片上得到最大光能量, 即求 $r_1(1 - r_1)$ 的极大值, 得 $r_1 = 0.5$ 。

4. 分束器 5 反射率分配值的计算

令 $I_R = I_{Ob}$, 由(1)和(2)式得:

$$R = \frac{r'^{n_1} \cdot \tau^{m_1} \cdot (1 - r_1) \cdot r_1 \cdot r_2}{r'^n \cdot \tau^m + r'^{n_1} \cdot \tau^{m_1} \cdot (1 - r_1) \cdot r_1 \cdot r_2} \tag{6}$$

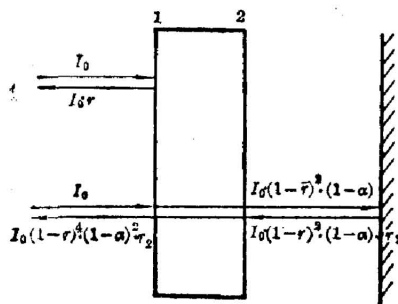


图3 能量传递示意图

将 r_1 、 r_2 的上述值及 $r'=0.99$ 、 $\tau=0.99$ 的值代入, 得 $R=0.024$ 。显然, 此值不合理, 从镀膜工艺考虑, 取 $R=0.15$, 从而使反射镜 6 的反射率取为 0.23。

二、仪器的特点

1. 差分特点

根据文献[4]所求得的反射干涉条纹的光强分布

$$I_r \propto \cos^2 \left(\frac{\varphi_1 - \varphi_2}{2} \right), \quad (7)$$

透射干涉条纹的光强分布

$$I_t \propto \cos^2 \left(\frac{\varphi_0 - \varphi_3}{2} \right), \quad (8)$$

式中 φ_0 、 φ_1 、 φ_2 和 φ_3 分别为无样品光的、样品的前表面反射光的、后表面反射光的以及透过样品光的相位。由(7)、(8)两式可见, 干涉条纹的光强分布仅与其相位差值有关, 而与相位的绝对值无关。

根据这一特点, 与以往各种经典干涉仪检测法不同, 它对仪器制造要求低得多。例如用一台泰曼干涉仪检测 $\phi 300 \text{ mm}$ 以上的样品, 要求干涉仪反射平板和分光镜的表面面形精度 $N = \lambda/20$, 局部精度 $\Delta N = \lambda/50$, 而本仪器对同样口径的反射镜和分光镜的要求, 分别为 $N = \lambda/2$ 和 $\Delta N = \lambda/8$ 。

同理, 对被检样品表面的面形要求也低得多。

2. 仪器的防震

物光与参考光以 $\theta = 45^\circ$ 夹角在全息底片上相干涉, 因此, 干涉条纹宽度 $d = \frac{\lambda}{2} / \sin \frac{\theta}{2}$, 即 $d \approx 1.3\lambda$ 。因为光源的功率只有 2 mW, 故拍摄全息图的曝光时间长达几十秒钟, 为保证全息图的清晰度, 在几十秒时间内条纹的移动不能大于 $d/4$ 。这就要求台面上各光学部件之间的相对移动所造成的光程差应小于 0.2μ 。因此对仪器要严格防震。

一般说来, 台面的震动方式是复杂的, 很难用计算结果进行设计。台面的固有频率 $f_0 = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{k}{M}}$, 式中 M 是平台质量, k 是防震结构的等效弹性系数。可以看出, 降低固有频率的办法一方面增加平台质量, 另一方面是选择弹性系数小的减震结构。本仪器选用泡沫橡胶防震垫 ($320 \times 320 \times 200 \text{ mm}^3$)。经测定和较长时间的实际使用, 具有良好的防震效果, 可以隔离 8 赫以下的震动。

3. 仪器的支承

仪器台面上的固有负荷及自身重量所引起的变形已经在仪器调整时予以校正。然而, 为了拍摄有样品时的反射波和透射波, 以及无样品时的物波, 在制作全息图过程中平台上的负荷有变化, 而这种负荷变化所引起的台面变形所造成的光程差只要大于 0.1μ 时 (分配在台面变形引起的光程差的允许值), 便将导致测量误差 $> \pm 5 \times 10^{-7}$, 甚至使检测工作无法进行。为了避免这种变形对干涉图的干扰, 设计仪器时将样品座放置在工作台的一个支承点上 (见图 4), 这样, 样品的大、小、有、无之变化仅反应在支承处受力的变化, 其力臂始终为

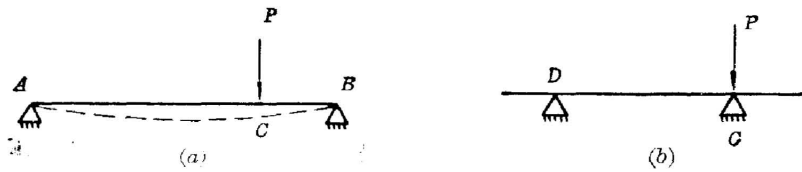


图4 工作台支承示意图

- (a) 样品座放置在工作台支承点外时,受压力 P 引起工作台面变形
 (b) 样品台放置在工作台一个支承点上时,同样的压力 P 不引起工作台面的变形。

零,因此,该力不导致工作台面的变形。

4. 样品座

仪器的样品座是将“点、线、面”定位机构改成三维的角度微调机构。样品置于样品座

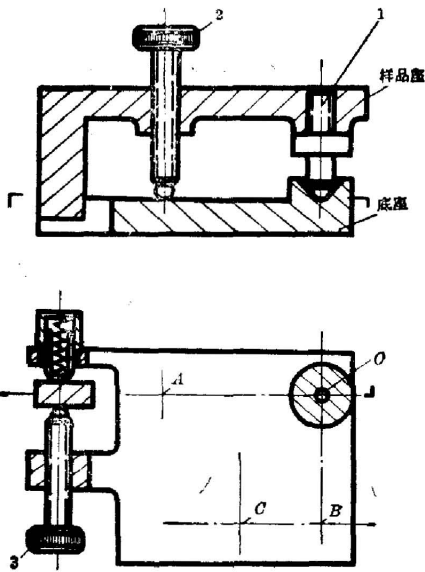


图5 三维调节机构示意图

(图5)上并固定之,于是样品和样品座可视为同一刚体。由于样品座之底座和大反射镜座均固定在同一台面上,因此,样品被测面相对于大反射镜反射面的调节,归结为样品座对工作台的相对位置的调节。球头螺钉1与样品座刚性联接,其球头放在底座(即工作台)上特制的圆锥形坑“O”内,于是“O”点便构成动坐标系(取在样品座上)的原点,该点相对于静坐标系(取在底座上)的位置。坐标受锥坑和自重约束,于是动坐标系剩下三个转动自由度。两只调节螺钉2,其球头分别支承在底座平面的A和B处,调节A点的螺钉可使样品座绕OB轴微调,调节B点的螺钉可使样品座绕着OA轴微调,调节螺钉3可使样品座绕着通过“O”点而垂直于AOB平面的轴线微调,从而完成三维角度微调。由于本仪器样品不需要绕OB轴(平行于光轴)调节,故被取消,为使机构更加稳定,将支承点B移至中间位置C处。因样品座较重,支承点选用滚动摩擦结构。对于自重约束不足的情况,可加设弹簧约束。

三、检测结果

仪器置于恒温暗室中使用。在测试过程中要求被测样品周围空气的温度起伏 $< \pm 0.1^\circ\text{C}$,并要求无较大的气流变化。图6(a)是用摄象管匹配工业电视机,在电视屏幕上拍摄下来的再现全息干涉条纹图。图6(b)是用照相机直接拍摄的再现全息干涉条纹图。为了实现透射干涉条纹及反射干涉条纹的提取,我们分别采用了带状光阑22和23。在干涉图中分别表现为中间一条的干涉条纹区和其两边两条较密的干涉条纹区。至于图中其它区域的密丛细微干涉条纹,则为各项交叉干涉的条纹。因此,可以在整个再现全息条纹中判别出哪些是反射条纹,哪些是透射条纹。

任意两点间的折射率差 Δn 可用下式^[4]求出:

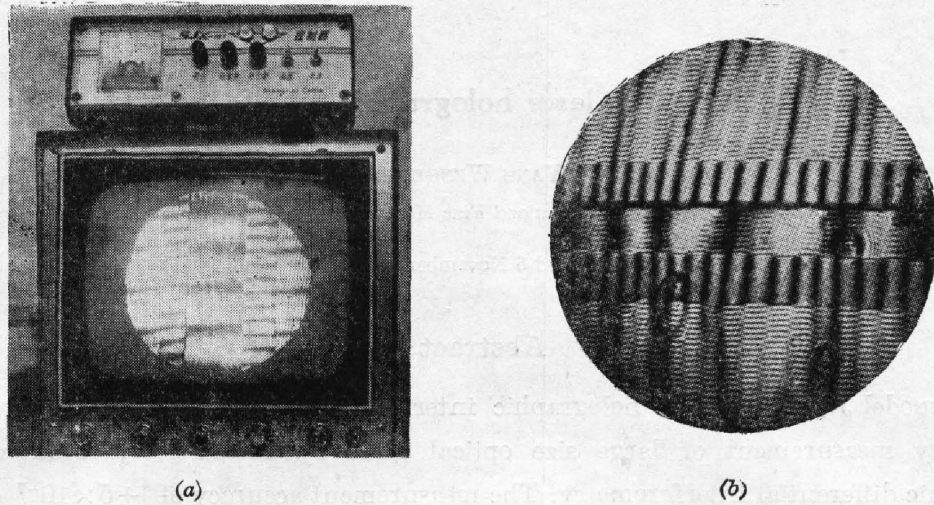


图 6 再现全息干涉条纹图

$$\Delta n = \frac{\lambda}{2h} [n \cdot m_t + (1-n) \cdot m_r], \quad (9)$$

式中 $\lambda = 6328 \text{ \AA}$, h 为样品厚度, m_t 是上述两点间的透射干涉条纹数, m_r 为上述两点间的反射干涉条纹数。

任意两点间的厚度差(由样品表面形缺陷所导致的) Δh 由下式^[4] 求出:

$$\Delta h = \frac{\lambda}{2} (m_r - m_t). \quad (10)$$

由(9)、(10)两式看出, 仪器可将样品内部的不均匀性与表面缺陷严格区别。

测量精度

当样品厚度 $h \geq 50 \text{ mm}$ 时, 可检测的折射率变化 $d(\Delta n) \leq \pm 5 \times 10^{-7}$; 当 $h \leq 10 \text{ mm}$ 时, $d(\Delta n) \leq \pm 1 \times 10^{-6}$ 。样品面形测量精度: $d(\Delta h) \leq \lambda/10$ 。

参 考 文 献

- [1] A. Masumura *et al.*; *Opt. & Laser Technol.*, 1971, **3**, No. 1 (Jan), 36.
- [2] J. W. Goodman; 《傅里叶光学导论》(科学出版社, 1976), 225.
- [3] E. R. Robertson, J. M. Harvey; 《The Engineering uses of Holography》(Cambridge at the University Press., London, 1970), 1~23.
- [4] 李锡善等; 《激光》, 1979, **6**, No. 6 (Jun), 38.

Model JQY-300 laser holographic interferometer

WANG WENGUI

(*Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica*)

(Received 6 November 1980)

Abstract

The model JQY-300 laser holographic interferometer is an instrument used for uniformity measurement of large size optical glass by means of double-exposure holographic differential interferometry. The measurement accuracy of $\pm 5 \times 10^{-7}$ can be obtained.

The characteristics of structure design are as follows:

1. Foamed rubber is used as vibration-proof leading to a simple construction, 8~9 Hz vibration can be isolated.
2. The optical path difference introduced by work-table deformation under heavy sample is eliminated, using the method of placing the sample holder at the support point.
3. The sample mount consists of three-dimension angle micro-adjust structure instead of common used "point, line, plane" positioning structure. It is convenient for machining, assembly, and the requirement of accuracy can be met.