

# 激光波面的全息诊断

余文炎 王桂英

(中国科学院上海光学精密机械研究所)

## 一、引言

本文报道一种检测激光波面的全息干涉法。它是把扩束望远镜放在三平板环路干涉仪中,同时产生扩束和缩束的二束光,利用这两束光拍摄干涉形成的轴向全息图。通过实测再现波面焦点的位置,可给出被测波面的曲率半径,其精度可达物理焦深,约比一般干涉法的测量精度高三倍左右。同时该方法具有图像直观和空间分辨等优点。这种全息图充分吸取了三平板环路干涉仪的优点<sup>[1]</sup>,实际上是一台白光全息干涉仪。基于不同的信息处理方法,这种全息图也可以理解为径向剪切干涉的结果。

## 二、实验装置

实验装置如图1所示。平板A、B和C组成一个环路干涉仪,负透镜 $L_1$ 和正透镜 $L_2$ 构成一副伽利略望远镜,它可以放在干涉仪的一个臂上,也可分别放在两个臂上。

为了便于讨论,把波面简化为球面波。图2表示装置的等效光路图。在该装置中,C板的反射光经过B板和扩束望远镜,把原来曲率半径为 $R$ 的波面扩束为 $R'$ 的波面,作为参考波面;C板的透射光经过A板反射,从反向进入望远镜,把波面曲率半径缩束为 $R''$ 的波面,作为被测波面。两束光经历相同的光程后在C处重新会合形成一组同轴全息图。根据拉格朗日-亥姆霍兹不变量原理可以得到:

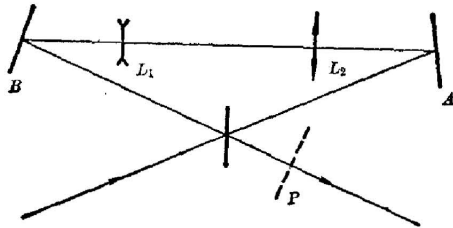


图1 环路全息干涉仪的装配图

Fig. 1 Schematic diagram of the holographic interferometer

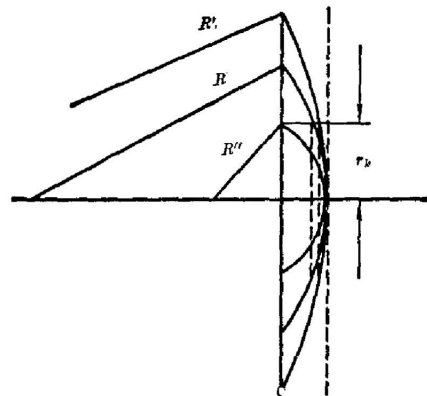


图2 环路全息干涉仪的等效光路图

Fig. 2 An equal optical trace shown in Fig. 1

$$R' = M^2 R, R'' = M^{-2} R, \quad (1)$$

式中  $M$  为扩束望远镜的放大率。一般说来, 在高功率激光器中传输的波面, 其曲率半径为几十米到百米的量级, 如果选用  $M=3\sim 4$ , 则可以获得曲率半径为 1 km 量级的近似平面波的参考波面, 同时待测波面的曲率半径缩小到数米的量级, 对全息再现后的测量较为适宜。

在使用上述全息干涉仪时, 应该考虑到实测位置和应测位置的差异。在标定好扩束倍率  $M$  和干涉仪中各个镜之间的距离以后, 可以根据测量数据修正为应测位置的波面曲率半径。

### 三、全息干涉图的处理结果

图 6 是用环路全息干涉仪对一束口径为 80 mm, 波面曲率半径为 59.01 m 的  $0.6328 \mu\text{m}$  会聚激光束记录的全息干涉图。下面用两种方法进行处理, 并且比较了它们的测量精度。

#### 1. 按准牛顿环的处理方法

根据一般的处理方法<sup>[2]</sup>, 求出第  $k$  和第  $k+m$  环带间的波差, 从而求出波面半径:

$$R = (M^2 - M^{-2}) (r_{k+m}^2 - r_k^2) / 2m\lambda \quad (2)$$

式中  $m$  为所测两环带的级差,  $\lambda$  为激光的波长。上式给出了  $m$  个环带的平均值。当波面具有空间起伏时, 上式可表示为微分形式:  $R = (M^2 - M^{-2}) r_k dr_k / \lambda$ , 式中  $dr_k$  表示在所测环带处相邻环的间距。

表 1 列出测量结果。由于条纹判读精度所限, 测量到的波面曲率半径接近物理焦深。

表 1 干涉图按牛顿环的处理结果

Table 1 Experimental results of interference pattern measured according Newton's rings

方 参 数	x 方 向					y 方 向				
	2	3	4	5	6	2	3	4	5	6
$r(\text{mm})$	3.63	4.47	5.11	5.70	6.22	3.57	6.38	5.12	5.74	6.28
$R(\text{m})$	57.71	61.99	56.13	57.29	56.86	57.64	61.46	61.46	60.26	60.06
$\Delta R(\text{m})$	-1.30	+2.98	-2.88	-1.71	-2.15	+1.03	+2.39	+2.39	+1.25	+0.97

#### 2. 按全息再现的处理方法

把全息干涉图的底片置于折射率匹配液池中, 用扩束的  $0.6328 \mu\text{m}$  平行光垂直照射在底片上, 在原方向上寻找全息再现点。注意到原全息图的参考波并非是严格的平面波, 因此在实测出再现像点到干涉图的距离  $R_{\pm}$  后, 必须加以修正, 才能得到原波面到全息干涉图位置的曲率半径。其修正后的表达式为:  $R = M^2(1 - M^{-4})R_{\pm}$ 。照片乳胶及基板的不平度将直接影响像的质量和测量结果。为了消除这种影响, 我们把全息图片置于一个经光学加工的液槽中。另外, 也可以利用加拿大胶把全息图片粘接在光学平板上, 组成折射率相匹配的硬片。

图 3(a) 表示原光束缩孔后在 5.16 m 处得到的几何焦点, 图 3(b) 是用全息片经过再现

后, 在相应的位置上得到的实像点。表 2 列出了五名不同观测者的测量结果。该数据已经根据全息干涉仪的结构参数, 把被测位置的数据折算到应测位置上。观测的平均相对误差为  $\pm 0.6\%$ 。



(a) (b)

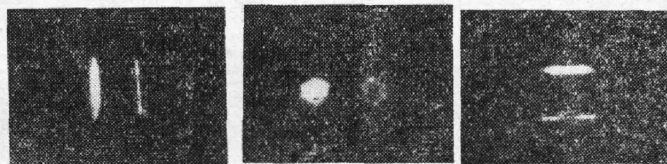
图 3

(a) 波束的几何焦点; (b) 全息再现波束的焦点实像

Fig. 3

(a) A real focus of a laser beam;

(b) A holographic reconstructed focus image



(a) (b) (c)

图 4 像散光束的焦体图像

(a)和(b)的右边是再现像点; (c)的下面是再现像点

Fig. 4 A focusing volume pattern of the astigmatical laser beam

(a), (b) right and (c) down are the holographic reconstructed images

表 2 利用全息图的再现像点测量波面曲率半径

Table 2 The radius of wavefront curvature measured by the reconstructed image of hologram

实 验 者	1	2	3	4	5
$R_{\text{全}}(\text{m})$	5.15	5.18	5.18	5.12	5.15
$R(\text{m})$	58.86	59.20	59.20	58.52	58.86
$\Delta R(\text{m})$	-0.15	+0.19	+0.19	-0.49	-0.15

为了考核全息再现像的复原精度, 我们使用一束像散光束进行试验, 图 4 分别给出子午焦线, 弧矢焦线以及二者之间最佳焦面的再现像。它们除了强度的差别之外, 基本形态及像散量是一致的。

## 四、该装置中的几个关键问题

### 1. 全息干涉图中的噪音来源及控制

全息干涉图的清晰度受到二方面的影响。首先是干涉仪中任何光学元件上的损伤点或者污点都是散射和衍射源, 最终引起全息干涉图像的光强调制。其次, 由于分光板  $C$  的反射率不符合要求, 会使干涉条纹的反衬度下降; 同时由于分光板背面的反射, 会在干涉图的背景上出现几套干涉图。我们把上述这些干扰图像清晰度的因素统称为“噪音”。通过挑选完好的光学元件和保持仪器的清洁度可以控制第一类噪音。对第二类噪音的控制可做如下分析。如  $E_1$  和  $E_2$  分别代表两相干波列的电场强度, 当  $E_1 = E_2$  时, 光场的背景最暗, 即噪音最小。设  $C$  板的反射率为  $R_1$ , 透射和反射的光束在历经干涉仪之后从  $C$  板出射时的光强分别以  $I_1$  和  $I_2$  代表。则  $I_1 = R_1^2 M^{-2} I_0$ ,  $I_2 = (1 - R_1)^2 M^2 I_0$ 。为了使两列波强度相等, 必须使

$R_1 = M^2 / (1 + M^2)$ , 表明分光板  $C$  只有按上式要求镀反射膜时, 才可使干涉图的反衬度最高。

全息图的另一种噪音来自分光板  $C$  背面反射像, 通过镀膜措施也可以得到控制, 假如在  $C$  板的背面再镀上增透膜的话, 其效果更佳。用  $R_2$  表示  $C$  板背面的反射率, 则干涉图的信噪比  $\eta = R_1 / (1 - R_1) R_2$ 。在  $M = 3.3$  时,  $R_1 = 92\%$ ; 镀增透膜的情况下,  $R_2 < 1\%$ 。此时  $\eta > 10^3$ , 这表明可以得到清晰的全息干涉图(图 6)。图 5 是在分光板  $C$  的反射率  $R_1 = 50\%$  时的全息干涉图, 可以清楚地看到来自  $C$  板多次反射形成的几套弱的干涉环, 还可以看出由于这种反射造成的横向剪切干涉对直条纹的调制。

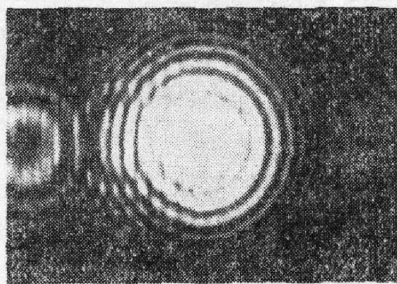


图 5 对 He-Ne 激光束拍摄的有“噪音”全息图  
Fig. 5 The hologram with noise taken from the He-Ne laser beam

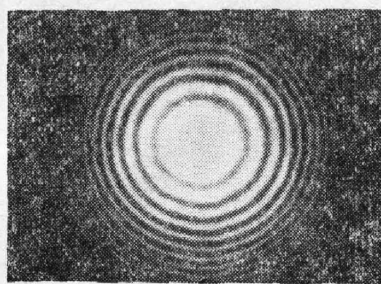


图 6 消除“噪音”后的全息图  
Fig. 6 The hologram without noise

## 2. 像散的补偿

该装置的望远镜由  $f/10$  的透镜组成, 球差已得到有效地控制。但是由于三平板反射镜的面形受加工精度所限, 有时平面镜可能等效于曲率半径为几百米的凹面镜(或凸面镜)。在入射光的入射角不为零的情况下即产生像散, 这种像散量在用平行光调节仪器的零场时有明显的反映。它可借助于望远镜的任何一块透镜的倾斜, 即可补偿这种像散<sup>[3]</sup>。

## 3. 扩束倍率 $M$ 的标定及仪器的相对测量精度

在环路全息干涉仪中, 扩束望远镜的扩束倍率是用一个已知的理想波面来标定的。我们分别实测扩束前后的波面半径, 用刀口法、套孔法和读数显微镜直读法来确定焦点位置。对于大曲率半径的波面是用平均焦深的办法确定焦点的位置。对于接近 60m 的波面, 重复测量精度达  $\pm 20$  cm。对于缩束为 5m 左右的波面焦点, 用读数显微镜直读焦斑的大小来确定焦点的位置, 这样测量重复精度最高, 可达  $\pm 1.2$  cm。根据(2)式可推导出  $M$  的测量误差  $\Delta M / M \approx \Delta R / R \approx \Delta R'' / R''$ , 代入测量数据后即可得到  $M$  的标定精度, 其值约为  $\pm 0.3\%$ 。波面的相对测量精度为:  $\Delta R / R = 2\Delta M / M + \Delta R_{\pm} / R_{\pm}$ 。对于理想波面, 其再现波面的相对测量精度与直接缩孔的相对测量精度相当, 即波面的相对测量精度约为  $\pm 1\%$ 。但是对于有调制的波面, 其相对测量精度取决于全息再现波面的实测精度, 即由  $\Delta R / R = \Delta R_{\pm} / R_{\pm}$  决定。

## 五、对高功率钕玻璃激光束的波面检测

钕玻璃激光器的末级输出口径为  $\phi 70$  mm, 它采用了多级空间滤波器及像传递技术, 而且所有的放大器均采用了多灯均匀照明, 因此输出光束质量较高。检测结果表明, 在其它方法不易探测到的情况下, 全息干涉法能够记录并重现激光波面的像散量及微量的光泵畸变。

图 7(a) 给出了  $1.054 \mu\text{m}$  激光波面的全息干涉图。7(b) 为用  $0.6328 \mu\text{m}$  激光再现 7(a) 的原初光源像点。

在采用一些补偿措施之后, 光束的质量进一步提高, 如图 7(c) 和 7(d) 所示。

表 3 列出了用全息法和哈特曼网格法对上述钕玻璃大功率激光器输出激光波面的测量结果。

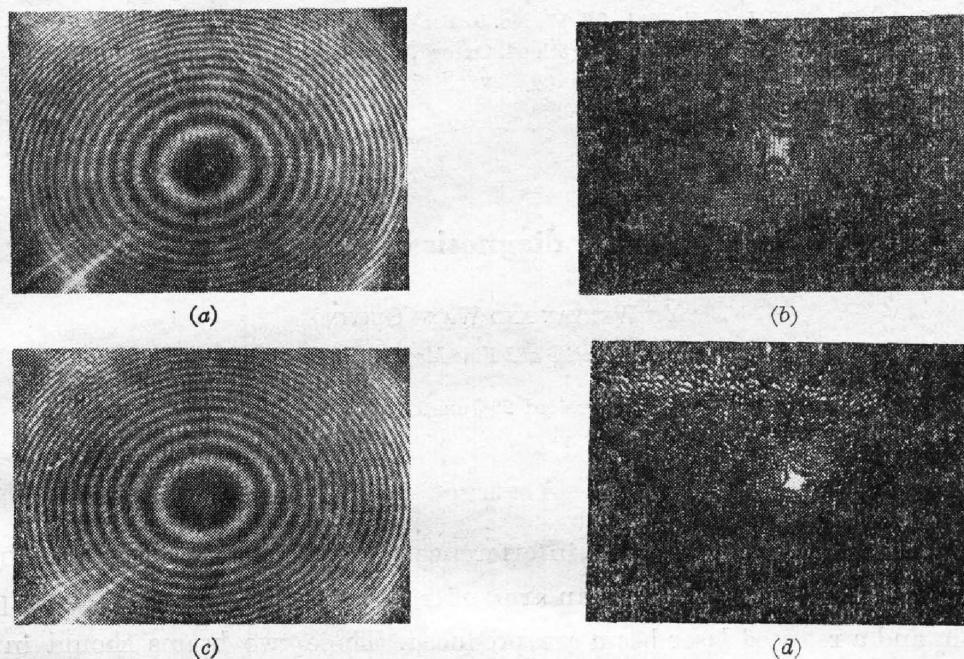


图 7

(a)  $1.054 \mu\text{m}$  激光束的全息图; (b) 为 (a) 的再现像; (c) 为 (a) 的波面经补偿后的全息干涉图; (d) 为 (c) 的再现像点

Fig. 7

(a) The holographic interference pattern of the  $1.054 \mu\text{m}$  Nd:glass laser beam; (b) The reconstructed image corresponding to (a); (c) The holographic interference pattern after compensating wavefront to (a); (d) The reconstructed image corresponding to (c)

表 3  $1.054 \mu\text{m}$  微米激光波面的测量结果

Table 3 Measurement results of  $1.054 \mu\text{m}$  laser wavefront

方法种类	参 数			
	$R_z(\text{m})$	$\bar{R}(\text{m})$	$R_{\text{max}}(\text{m})$	$\delta_{\text{像散}}(\mu\text{m})$
全息再现法(未补偿)	41.28	49.36	57.19	1.52
准牛顿环法(未补偿)	41.7	50.9	58.1	1.6
哈特曼网格(未补偿)		44		
补偿后全息再现法	42.1	46.9	51.5	0.9

最后应该指出, 全息干涉法除了测量精度高、图像直观外, 还可以把高功率激光器输出的不可见的和瞬时的激光波前存储起来, 方便地用连续的可见激光束使它再现, 这就为光程修补技术以及自适应波面补偿技术提供了方便和可能性。

本工作是在王之江教授等“三平板环路干涉仪”工作的基础上发展起来的。在工作过程中与邓锡铭教授、范滇元和陈时胜同志进行了有益的讨论。张明科同志参加了工作,并且得到郑玉霞和高脐媛等同志的协助,作者谨表谢意。

### 参 考 文 献

- [1] 王之江, 蔡希洁等; *IEEE J. Q. E.*, 1981, **QE-17**, No. 9 (Sep), 1768.
- [2] M. Born, E. Wolf; *Principles of Optics*, (5th ed. Oxford, Pergamon, 1975).  
母国光, 李若璠; *普通物理学——光学部分*(高等教育出版社, 1965).
- [3] 范滇元, 余文炎; *激光*(待发表).

## A holographic diagnosis of laser beam

YU WENYAN AND WANG GUIYING

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

(Received 29 June 1981)

### Abstract

This paper reports a holographic interference method for measuring wavefront of laser beam. A telescope is placed in an arm of ring interferometer, so an expanded laser beam and a reduced laser beam are produced. These two beams should interfere and form a co-axial hologram. The curvature radius of the laser beam is obtained by measuring localization of the reconstructed image. The measurement precision of the wavefront curvature radius corresponds to the depth of focus, three time higher than common interferometer. And the pattern is direct visual and spatial resolvable.