

双平板剪切激光干涉仪

梁向春 蒋玉柱 汤宝珍 施阿英

(中国科学院上海光机所)

提 要

本文分析了采用激光源时,双平板横向剪切干涉仪的工作原理,给出了干涉仪参数选择,并用此干涉仪对激光束的波前进行了测试。

Laser shearing interferometer with two plates

Liang Xiangchun Jiang Yuzu Tang Baozheng Shi Aying

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

Abstract

Operation principles are analyzed for a transversely shearing interferometer with two plane plates and with laser as the light source, parameter selection for the interferometer are given. The interferometer was used in measuring the laser beam wavefront.

一、引 言

采用氦-氖光源的剪切板干涉仪,在调整准直仪和测量象差中已显示了优越性^[1],但当用到相干长度较短的高功率钕玻璃激光束时,往往要选择合适厚度和劈角的剪切板,给使用带来不方便。为了克服这些缺点,研制了用两块平板组合起来利用空气间隙中的两个面反射光束,构成横向剪切干涉仪。该干涉仪可做到剪切量可调,相干涉的两束光光程差可调,空气隙的劈角可调,这就便于使用者获得所要研究的干涉图形。P. Hariharan^[2]曾利用这种形式的干涉仪,用氦-氖光源测望远镜物镜的干涉图,他只提供照相例子,没有

给出定量分析。我们采用此干涉仪对高功率钕玻璃激光束的波前和相干长度进行测量,为激光束参量测试提供了一种方便的工具。

二、工作原理

双平板剪切激光干涉仪的几何图象如图1所示。取合适的直角坐标系, x 轴在纸面上, y 轴垂直于纸面,空气劈用虚线表示,劈的方向可调。我们设具有单位振幅入射波的形式为

$$\psi_1 = e^{i\phi(x, y)} \quad (1)$$

这里的 $\phi(x, y)$ 是描述波前的位相函数,令 ψ_1 经平面 P_1 反射后仍为 ψ_1 , 而经平面 P_2 反射

收稿日期: 1979年6月4日。

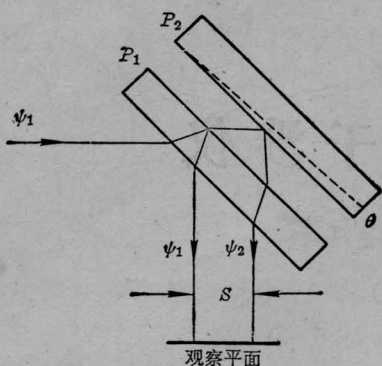


图1 双平板剪切干涉仪几何图象

后则变为

$$\psi_2 = e^{i[\phi(x+s, y) + \beta x + \gamma y]} \quad (2)$$

这里的 s 是剪切量, β 和 γ 是由于空气劈角 θ 引起的倾斜因子。当两列波 ψ_1 和 ψ_2 相干涉时, 合成波的光强明暗起伏服从关系式

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \Delta\phi \quad (3)$$

因振幅的具体形式对分析是不重要的, 我们主要考虑位相项。为了简单起见, 我们分析无象差的球面波情况, 这时 $\psi_1(x, y)$ 可近似表示为

$$\psi_1(x, y) = e^{i\alpha(x^2 + y^2)} \quad (4)$$

其中 $\alpha = \frac{K}{2R}$ (R 为曲率半径, $K = \frac{2\pi}{\lambda}$)。考虑到劈角 θ 的作用, 分别就如下三种干涉仪工作状态分析定量关系。

1. $\beta = \gamma = 0$, 无倾斜因子的影响, 此时 ψ_1 和 ψ_2 之间的位相差为

$$\Delta\phi = \alpha(2sx + s^2) \quad (5)$$

当 $\Delta\phi$ 为 $2m\pi$ ($m = 0, 1, 2, \dots$) 时, 干涉条纹取极大值, 即

$$\alpha(2sx + s^2) = 2m\pi \quad (6)$$

对方程两边微分则有

$$2\alpha s dx = 2\pi dm \quad (7)$$

由(7)显见, 当 dm 变化一个条纹数时, 则 dx 的变化为一个条纹宽度 d , 则(7)式可写为

$$2\alpha s d = 2\pi \quad (8)$$

将 $\alpha = \frac{K}{2R}$ 代入(8)式, 即得

$$R = \frac{sd}{\lambda} \quad (9)$$

此式与一般的杨氏干涉相一致, 干涉条纹取向始终垂直于剪切方向。

2. $\beta = 0, \gamma \neq 0$, 两平板之间的空气劈的方向垂直于剪切方向, 此时位相差函数为

$$\Delta\phi = \alpha(2sx + s^2) + \gamma y \quad (10)$$

对 x 和 y 微分则有

$$\frac{dy}{dx} = \tan \delta = -\frac{2\alpha s}{\gamma} \quad (11)$$

这里 $\alpha = \frac{K}{2R}$, $\gamma = K\theta'$, 其中 θ' 是由于空气隙劈角 θ 使得两反射光束 ψ_1 和 ψ_2 之间有一个夹角 θ' , 当 θ 很小时, θ' 与干涉条纹之间的关系为 $\theta' \approx \frac{\lambda}{d}$, 这时(11)式可写为

$$R = -\frac{sd}{\lambda \tan \delta} \quad (12)$$

它表明, 在这种干涉仪工作状态下, 对无象差球面波而言, 一般获得具有斜率角 δ 的直条纹只有当 $R \rightarrow \infty$ 时, $\delta = 0$, 即干涉条纹取向平行于剪切方向, 显然, 这是调整准直仪的一种判断准则。通常把发散波表示为负曲率, 由 δ 的取向可区别出发散波或会聚波。

3. $\gamma = 0, \beta \neq 0$, 两平板之间的空气劈的方向平行于剪切方向, 此时位相差函数为

$$\Delta\phi = \alpha(2sx + s^2) + \beta x \quad (13)$$

$$\text{当 } \alpha(2sx + s^2) + \beta x = 2m\pi \quad (14)$$

时获得干涉极大值, 对方程两边微分则有

$$(2\alpha s + \beta) dx = 2\pi dm \quad (15)$$

令 $dm = 1, dx = d, \beta = K\theta'$, 代入(15)式得出

$$R = \frac{sd}{\lambda \left(1 - \frac{\theta' d}{\lambda}\right)} \quad (16)$$

此时, 干涉图为垂直于剪切方向的直线, 与(9)不同的只是多了一项 θ' 的影响, θ' 可由计算获得

$$\theta' = 2\theta \quad (17)$$

式中 θ 为空气隙劈角, 在这种干涉仪工作状态下, 空气隙的劈角 θ 最好用秒级测角仪精确测得。

上述三种工作状态具有一致性, 都可从干涉图形上测出有关参量去求得球面波的曲率半径 R 。有些参量也可计算, 如剪切量 s 可推算为

$$s = 2t \sin \vartheta' \quad (18)$$

式中 t 为空气隙厚度, ϑ' 为入射角。

当 ψ_1 为具有象差的波前时, 则干涉图形就不是直条纹, 通常象差的影响是作用到象波的位相上, 导致对不同象差的波前, 其干涉图形对应不同的形状, 文献[3]有类似报导, 此处不再详述。

三、实验结果

双平板剪切激光干涉仪的光源就是待测的激光束, 干涉仪结构如图 2 所示, 其中一块板是固定不动的, 另一块板可相对于固定板做平移, 其平移范围为 0~3 厘米, 可移动板能在两维方向上做倾斜调整, 便于调整两平板间的空气隙为平行间隙或为劈间隙。两块平板固定在一个平台上, 该平台可在 360 度范围内任意转动, 便于控制剪切量。平板口径为 150 毫米, 若干涉仪与入射光束成 45° 角工作时, 最大可测光束口径为 100 毫米。

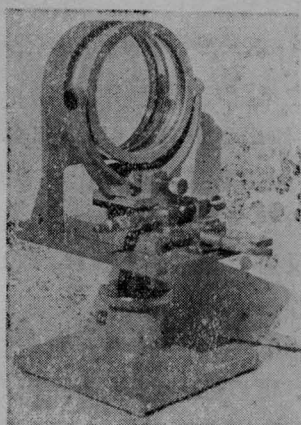


图 2 双平板剪切激光干涉仪

1. 验证干涉仪三种工作状态下获得球面波曲率的一致性

采用具有 1° 楔角的干涉平板(K₉玻璃),

面形精度为 $\lambda/20$, 用氦-氖光源经平行光管扩束为球面波, 射向干涉仪。若球面波曲率不变, 分别将干涉仪调成工作原理中所述的三种工作状态, 去测得球面波曲率, 测试装置如图 3 所示。图 4、5、6 分别表示双平板剪切干涉仪处于三种工作状态时的横向剪切干涉图, 光束口径为 45 毫米, 其测量数据和结果如表所示。从使用角度来看, 劈角垂直于剪切方向更为方便些, 而且又能区别发散波和会聚波。另外两种工作状态要精密测角, 且发散波与会聚波的趋向可用其它方法确定。

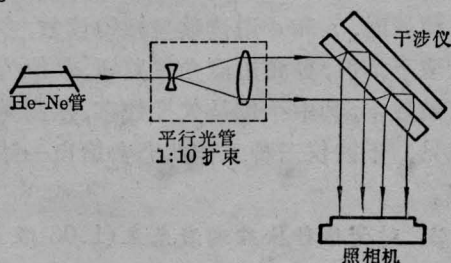


图 3 测球面波曲率半径的实验布置

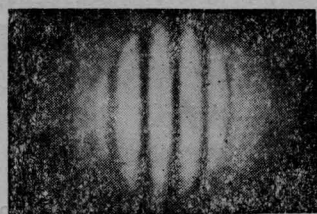


图 4 $\beta = \gamma = 0$ 无劈角时的剪切干涉图

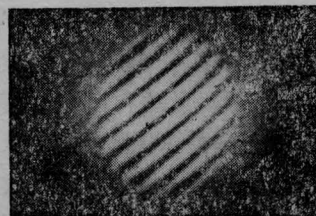


图 5 $\beta = 0, \gamma \neq 0$, 劈角 \perp 剪切方向的干涉图

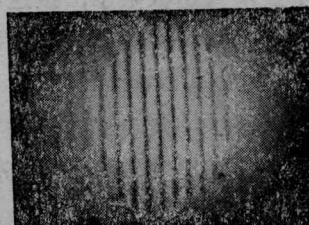


图 6 $\gamma = 0, \beta \neq 0$, 劈角 \parallel 剪切方向的干涉图

干涉仪状态	剪切量 s	条纹 宽度 d	条纹相对 于剪切方 向的倾角 δ	曲率半径 R
$\beta=\gamma=0$ 无劈角剪切	13.81	7.74	90°	$R = \frac{sd}{\lambda}$ $=169(\text{米})$
$\beta=0 \quad \gamma \neq 0$ 劈角 \perp 剪切方向	13.87	5.67	38°	$R = -\frac{sd}{\lambda \tan \delta}$ $=-163(\text{米})$
$\gamma=0 \quad \beta \neq 0$ 劈角 \parallel 剪切方向 $\theta \approx 10$ 秒(弧)	13.88	3.36	90°	$R = \frac{sd}{\lambda(1-\frac{\theta^2 d}{\lambda})}$ $=161(\text{米})$

波长 $\lambda=0.63$ 微米

测量时, s 和 d 用读数显微镜读数, 多次测量取平均值, 劈角用测角仪监视, R 值为三位有效数字, 其中个位是欠准数字, 从测量结果显见, 干涉仪三种工作状态会给出一致性结果。

2. 对毫微秒钷玻璃激光束(1.06 微米)波前测试

研制双平板剪切干涉仪的目的是为了对高功率单脉冲钷玻璃激光束的质量进行诊断, 这里给出了由普克尔盒电光开关调 Q 的钷玻璃激光经一次放大, 再经空间滤波器透镜聚焦并发散后较好的球面波, 通过干涉仪获得直条纹, 实验布置如图 7 所示。干涉仪处于空气隙无劈角的状态, 当空气隙间距分别为 10 毫米、15 毫米、20 毫米、22.5 毫米时, 获得的干涉图如图 8 所示。由于照相底片接收灵敏度较高, 直接利用平板(具有 1° 楔角)本身反射率 4% 就可以了。从干涉图显见, 随着干涉仪间距拉远, 干涉条纹对比度下降, 当 $t=22.5$ 毫米时, 条纹对比度极差, 说明光束相干长度到达极限了, 按这种方式干涉, 相干长度应为

$$\Delta l = 2t \cos i'$$

其中 i' 为入射角, 一般我们在测波前时, 都是使用干涉条纹对比度较好的状态, 即在相干长度以内进行干涉测量。

当使用无劈角干涉平板的情况下, 为了

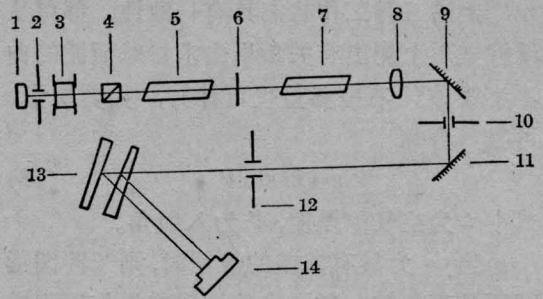


图 7 测试钷玻璃激光束波前的布置图

1—平凸全反射镜($R=5$ 米); 2—光阑($\phi 2$ 毫米); 3—普克尔盒(KDP晶体); 4—偏光镜; 5, 7— $\phi 20 \times 520$ 钷玻璃棒; 6—输出镜(反射 30%); 8—滤波透镜($f=300$ 毫米); 9, 11—全反射镜; 10—光阑($\phi 1$ 毫米); 12—光阑($\phi 20$ 毫米); 13—干涉仪; 14—照相机

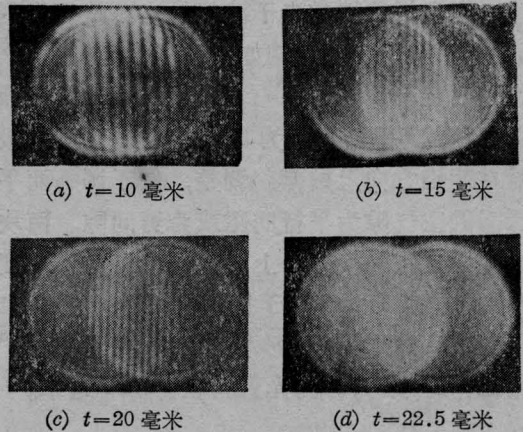
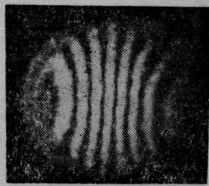


图 8 改变空气隙间距 t 的干涉图

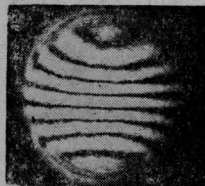
消除另外二个面反射的影响, 防止干涉图重迭, 则要在使用面上镀反射膜, 另外两个面上镀增透膜, 为了要获得高对比度干涉条纹, 反射率要进行适当的选择, 原则上是要使两个反射面的反射光强相等, 即 $R_1 \approx (1-R_1)^2 R_2$ 是镀反射膜的依据。此外, 又要尽量消除多次反射的影响, 获得双光束干涉, 这就要求信噪比要高, 可以证明, 这种干涉仪的信噪比 $\eta = (R_1 R_2)^{-1}$, 因此应在接收器能曝光的情况下, 尽量降低 R_1 和 R_2 的值。实践证明当用黑纸(照相纸曝光显影制成)烧蚀接收激光剪切干涉图时, 则反射率组合在 25% 与 45% 附近为宜。

3. 进行二维横向剪切干涉图的测量

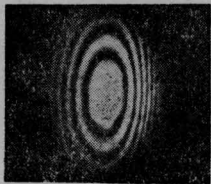
具有象差波前的横向剪切干涉图,不直接与波前形状有关系,使得数据处理变得较繁,对于具有旋转对称象差的波前数据处理,已报导的方法是沿着口径进行波前形状的分析^[3],但对于非旋转对称的波前象差干涉图的分析,只用一个波前图去描绘是不充分的,如果在相互正交的两个方向上进行剪切,并获得两个剪切干涉图,则就有可能重现波前。此处描述的双平板横向剪切干涉仪能实现两维方向干涉图的获得。图9成对地示出



(a) 在轴上, x 方向剪切



(b) 在轴上, y 方向剪切



(c) 离轴 10° , x 方向剪切



(d) 离轴 10° , y 方向剪切

图9 两维方向横向剪切干涉图

了从 $f=550$ 毫米, $f/10$ 透镜发出的波前的横向剪切干涉图,采用氩-氟光源,将透镜放在轴上和离轴 10° 进行测量,其中(a)和(b)是具有旋转对称球差的两维横向剪切干涉图,干涉图形状是一致的。而(c)和(d)是透镜离轴时引起非旋转对称彗差时的两维横向剪切干涉图,显见两个干涉图形是不相同的,进行数据分析后,可获得象差波前的形状,处理方法已有报导^[4]。

四、结束语

双平板剪切激光干涉仪的研制,为高功率钕玻璃激光束的光束质量鉴定提供了测试工具,它方便,适用,数据可靠。对于凡是能被玻璃反射的其它波长激光束的波前测试也是适用的。

参 考 文 献

- [1] 梁向春,王端华;《激光》,1979,6, No. 4, 47
- [2] P. Hariharan; *Appl. Opt.*, 1975, 5, 1056.
- [3] J. B. Saunders; *Appl. Opt.*, 1970, 9, 1623.
- [4] M. P. Rimmer; *Appl. Opt.*, 1974, 13, 623.

科学札记

小型可调谐稳频 CO_2 激光器

可调谐 CO_2 激光器应用在分析化学和环境污染监测方面。由于它的高功率、高效率和多光谱线特性以及 CO_2 激光器在 10.6 微米大气中的优良传播,为发展遥测技术提供了一个重要手段。

为了便于应用,要求在保证激光输出功率的前提下,激光器应尽量紧凑小型化。我们研制的封离型可调谐稳频 CO_2 激光器,由石英材料制成。谐振腔长 80 厘米,放电管长 60 厘米,放电管内径 6.3 毫米。整个激光器与调谐装置放在铸铝底座上。仪器

盒的盖板是有机玻璃板,可直接观察到内部工作情况。仪器体积为 $90 \times 15 \times 20$ 厘米³,重约 15 公斤。电源采用全晶体管逆变电路小型高压电源。激光器的选频是通过转动平面衍射光栅来实现的。波长调谐范围为 9.2~10.8 微米,激光谱线 70 条,输出的单线功率最大为 5 瓦。激光功率的漂移量每小时小于 2%,寿命在 1 年以上,基本上达到了使用要求。

(中国科学院环境化学研究所 马如森)