

菲涅耳波带板干涉仪及其在 激光束波面检测中的应用

顾天衢 伍树东 余文炎

(中国科学院上海光学精密机械研究所)

提 要

本文提出一种具有实用意义的新型干涉仪——菲涅耳波带板干涉仪。它综合了径向剪切和横向剪切干涉仪的特点,可简化干涉图的分析;并具有共光路的性质,可用于宽频带激光波面及短脉冲激光波面的检测。本文对该干涉仪进行了分析,对它在波面检测方面作了实验研究。

Fouéré 等人曾提出基于全息径向剪切干涉仪^[1],这种干涉仪具有共光路的特点,从而有一定的抗干扰性,有可能被应用到宽频带或脉冲激光束波面的检测中去。但由于该干涉仪结构及制作上的限制,它抗激光破坏的阈值低,易引入全息噪音,仅能用于会聚光束波面的测量,使之不能有更广泛的应用。此外,这种全息干涉仪,当被测光波长与制作时的激光波长不一样时,将引入色差^[2]。

本文提出一种基于菲涅耳衍射的干涉仪——菲涅耳波带板(简称波带板)干涉仪。它主要由两块焦距不同的菲涅耳波带板组成,从而可引入较大的径向剪切量,使得干涉图分析变得十分简单,除此之外,它还保持了文献[1]中干涉仪的优点,基本上克服了如前所述的那些缺点,从而使波带板干涉仪具有真正实用的价值。

一、菲涅耳波带板干涉仪及其分析

1. 基本原理

菲涅耳波带干涉仪的基本光路如图1所示。 ZP_1 , ZP_2 分别为具有不同一级衍射焦距

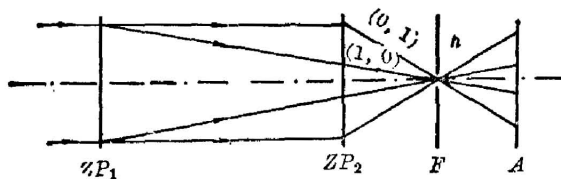


图1 波带板干涉仪原理

Fig. 1 Principle of the interferometer

分别为具有不同一级衍射焦距 f_1, f_2 的菲涅耳波带板,它们的一级焦平面 F 彼此重合。当有一近乎平行的被测光入射时,它被 ZP_1 和 ZP_2 衍射成许多不同级次的分量。其中 ZP_1 的零级被 ZP_2 衍射后所得的一级 $(0, 1)$ 及 ZP_1 的一级被 ZP_2 衍射后所得的零级 $(1, 0)$ 是产生干涉的两束光。为了排除其它级次的光对干涉

图的干涉,在 F 面上置一带有小孔 h 的屏,仅使 $(1, 0)$ 和 $(0, 1)$ 光通过。

当 ZP_1 和 ZP_2 的一级焦点共轴时,干涉仪处于纯径向剪切工作状态,径向剪切量由

$M=f_1/f_2$ 所决定;若调节 ZP_2 的位置,将其相对于 ZP_1 有一少量平移,从而使得两焦点相互略有横向错开,这等价于在二干涉波面间引入一定的夹角,于是在接收平面 A 上可呈现非闭合的干涉条纹。

2. 简化干涉图分析以及由此而引入的误差

设入射到 ZP_1 上的被测波面为 $\exp[ik\phi(x', y')]$, 若菲涅耳波带板对入射波的位相调制为 $\exp(-i\alpha r'^2)$, $r'^2=x'^2+y'^2$, 则接收面 A 上干涉光强分布将正比于

$$\left| \exp[ik\phi(x, y) + i\alpha(x^2+y^2)] + \exp\left\{ ik\phi\left(\frac{x-d}{M}, \frac{y}{M}\right) + i\alpha[(x-d)^2+y^2] \right\} \right|^2, \quad (1)$$

其中 (x, y) 是 A 平面上以轴中心为原点的坐标, (x', y') 是 ZP_1 平面上以轴心为原点的坐标, (x, y) 和 (x', y') 坐标差是一个由接收面和 ZP_2 距离及 f_1 所决定的比例常数; M 为径向剪切量 $M=f_1/f_2$; d 为 ZP_1, ZP_2 两个波带板的一级焦点横向位移量; α 为波带板参数。(1)式中已(不失一般地)令入射光振幅为常量 1, 且二干涉光振幅相等。

将 $\phi(x, y)$ 展成多项式^[3]

$$\phi(x, y) = \sum_{n=0}^k \sum_{m=0}^n B_{nm} x^m y^{n-m},$$

则

$$\phi\left(\frac{x-d}{M}, \frac{y}{M}\right) = \sum_{n=0}^k \sum_{m=0}^n \frac{B_{nm}}{M^n} (x-d)^m y^{n-m}, \quad (3)$$

由上式可见 $M(M>1)$ 越大, $\phi\left(\frac{x-d}{M}, \frac{y}{M}\right)$ 就越接近于常量, 当在(3)式中二次以上的量可忽略时, 将坐标经变换(旋一合适角度)后, (1)式可写成

$$2\{1 + \cos k[\phi(x, y) + \alpha'x]\}, \quad (4)$$

α' 由 B_{11}, B_{10}, M 和 $2\alpha d$ 决定, 在实际分析干涉图时并不需要知道 α' 的确切值, 从(4)式可方便地从干涉图推算出 $\phi(x, y)$ 。

因忽略(3)式中的二次以上项, 由(4)式分析干涉图, 则对次数为 $n(n \geq 2)$ 这一项的系数 B_{nm} 所引入的相对误差为

$$\Delta E_n = (B_{nm}/M^n)/B_{nm} = (1/M^n). \quad (5)$$

当 M 值为 6~7 时, ΔE_2 约为 2%, 属一允许的量, n 再大时, ΔE_n 更可忽略不计。

3. 波带板参数及其像差分析

菲涅耳波带板 ZP_1 和 ZP_2 是在镀铬光学玻璃平板上光刻而成的, 这是属于振幅型波带板, 其振幅透射函数可写成

$$F(r) = \text{circ}(2r/D) \cdot f(r), \quad (6)$$

$$f(r) = L + (H-L) \left[\frac{1}{2} - \text{sgn}(\sin \alpha r^2) / 2 \right], \quad (7)$$

$$\text{circ}(2r/D) = \begin{cases} 1, & (2r/D) \leq 1 \\ 0, & \text{其它} \end{cases}$$

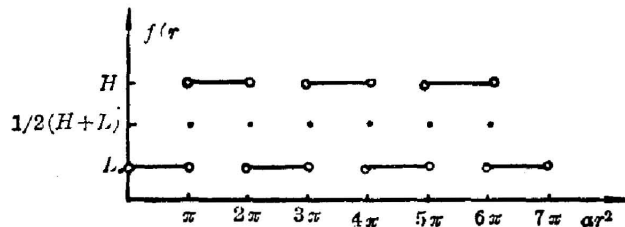


图 2

上式中 D 为波带板直径, r 是以波带板中心为原点的矢径, $\alpha(\alpha>0)$ 是一个与波带板参数有关的量, $0 \leq L \leq H \leq 1$ 。 $f(r)$ 的形状如图 2 所示, 将其展成傅里叶级数, 可得

$$f(r) = \frac{1}{2}(H+L) + (L-H) \sum_{n \neq 0}^{\infty} \frac{\exp(in\pi/2)}{n\pi} \sin \frac{n\pi}{2} \exp(-in\alpha r^2). \quad (8)$$

下面考虑 H 、 L 的选择。从(3)式, (4)式看, 似乎 M 越大越好, 但 M 太大, ZP_1 与 ZP_2 间距太长, 光路排布不方便, 易受环境影响, 因此要选合适的 f_1 和 f_2 , M 也由此而定。当 f_1 、 f_2 选定后, 再要恰当地决定 ZP_1 和 ZP_2 的 H 和 L 值, 使干涉条纹对比度最大, 由图 1 可见, ZP_2 的一级衍射效率要高些, 因此对 ZP_2 ($H=1, L=0$)。按(8)式算出 ZP_1 的 H 和 L 之间关系, 它使(1, 0)光和(0, 1)光的振幅相等

$$\frac{L}{H} = \frac{(f_1/f_2) - 1}{(f_1/f_2) + 1}. \quad (9)$$

一般 $H=1$ (玻璃基板), 则 $L = [(f_1/f_2) - 1] / [(f_1/f_2) + 1]$, 光强透过率 $|L|^2 = [(f_1/f_2) - 1]^2 / [(f_1/f_2) + 1]^2$ 。这就是制作 ZP_1 时所需的参数之一, 可见 $M = (f_1/f_2)$ 越大, L 就越接近于 1。最后制得 ZP_1, ZP_2 的参数如表 1。由表 1 知 $(f_1/f_2) \approx 6.7$, 根据前面分析可知, 这个 M 值使由(4)式分析干涉图而带来的误差可忽略, 再由此 (f_1/f_2) 值可得 $(L/H)^2 \approx 0.5$, 因此 ZP_1 的 L 基本能使干涉图对比度最大。

表 1 菲涅耳波带板参数(长度单位: mm)

Table 1 Parameters of the Fresnel zone plates (unit of length: mm)

| | $f_0.6328 \mu\text{m}$ | $f_1.06 \mu\text{m}$ | H^2 | L^2 | D |
|--------|------------------------|----------------------|-------|---------|------|
| ZP_1 | 2123.3 | 1267.6 | 1 | 0.4~0.5 | 32.8 |
| ZP_2 | 314.8 | 187.9 | 1 | 0 | 12.6 |

采用文献[4]中所述的方法, 对菲涅耳波带板进行像差分析, 所不同的是, 按(1)式, 我们所感兴趣的是波带板出瞳处的波面与二次曲面的偏离, 而不是与球面波的偏离。

设物点在 (x_0, y_0, z_0) 点, 其关于波带板的高斯像点为 (x_2, y_2, z_2) , 它们之间满足

$$(x_2/z_2) - (x_0/z_0) = 0, (y_2/z_2) - (y_0/z_0) = 0, (1/z_2) - [(1/z_0) + (1/f)] = 0. \quad (10)$$

一个由 (x_0, y_0, z_0) 点发出的理想球面波, 经波带板调制后, 其一级波面与中心在 (x_2, y_2, z_2) 的二次曲面偏离 Δ 为

$$\Delta = \frac{1}{8z_0^3} (x^2 + y^2)^2 + \frac{1}{2} \left(\frac{x_0^2}{z_0^3} - \frac{x_2^2}{z_2^3} \right) x^2 + \frac{1}{2} \left(\frac{y_0^2}{z_0^3} - \frac{y_2^2}{z_2^3} \right) y^2 + \frac{1}{2} \left(\frac{x_0 y_0}{z_0^3} - \frac{x_2 y_2}{z_2^3} \right) xy, \quad (11)$$

(11)式中第 1 项为球差, 第 2, 3, 4 项为像散。若按(4)式分析条纹, 它将反映在最终结果中。

由(10)、(11)式可见, 当被测光以平行共轴形式入射时, 即 $x_0 \rightarrow 0, y_0 \rightarrow 0, z_0 \rightarrow \infty$, Δ 完全消失。因此, 波带板干涉仪最适合于平行正向入射激光束波面的检测, 此时由于干涉仪引入的误差最小。事实上由(11)式及表 1, 当 z_0 为十几米以外时, 球差完全可忽略; 当入射光主光线与光轴夹角在 $1^\circ \sim 2^\circ$ 之内时, 像散也可忽略。上述两条件在对大多数激光器激光波面的测量时均容易满足。

4. 波带板干涉仪的光能利用率

若定义投射到 A 上参予干涉的光能与入射光能之比为该干涉仪的光能利用率, 则由(8)式可得在最佳振幅匹配下的光能利用率 η 为

$$\eta = \frac{1}{\sigma^2} \cdot \frac{1}{[(f_1/f_2) + 1]^2} \quad (12)$$

可见随着 $M = (f_1/f_2)$ 的上升 η 几乎以 M^2 速率下降。

5. 孔 h 的选择

图 3 是从波带板干涉仪获得的一些干涉条纹照片。从照片上我们可以看出干涉图中间带有一些环状调制干扰，它主要是由于 $(1, 0)$ $(0, 1)$ 以外的光漏过不得不具有一定大小的滤波孔 h 而产生的，因此选择一个适当大小的滤波孔是相当重要的，它必须足够大而使两个焦点都不受阻碍地通过，同时又充分小以尽量减少杂光的干扰，一般情况取其直径为 $0.6 \sim 0.8 \text{ mm}$ 。

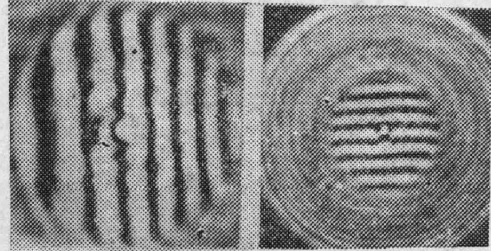


图 3 由干涉仪得到的几张干涉图
Fig. 3 Interferograms produced by the interferometer

6. 波带板干涉仪的实验考核

为验证波带板干涉仪的测量精度，我们将一近乎纯像散的波面的高质量聚焦镜 ($f=1000 \text{ mm}$) 将其会聚后测得其像散值为 39 mm ，然后撤去该透镜，用波带板干涉仪来测量该波面，得到的干涉图经计算机数据处理后获该波面的解析式，由此求得在 $f=1000 \text{ mm}$ 透镜会聚下它的像散值为 39.7 mm ，与实测值相比，两者的相对误差仅为 2% ，且已包括了开始实测像散的测量误差，干涉条纹处理时的定级误差等，这充分说明了该干涉仪的可行性。

二、在激光束波面检测中的应用

1. 对铍玻璃棒状激光放大器光泵热畸变的研究

铍玻璃棒状激光放大器光泵热畸变的问题一直受到人们的普遍重视^[5]。利用波带板干涉仪配之以 Zygo 干涉仪的分析，可得到放大器光泵热畸变生动而直观的资料。

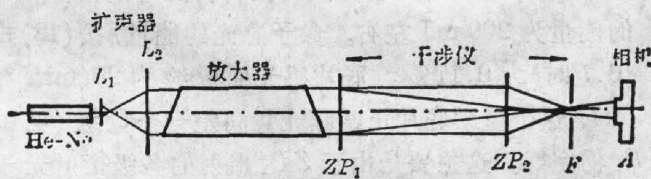


图 4 激光棒状放大器光泵热畸变研究实验排布
Fig. 4 Arrangement to study the thermal distortion of a laser amplifier

图 4 是利用波带板干涉仪对铍玻璃棒状激光放大器光泵热畸变测量的光路示意图。在平面 A 上置一照相机，在流动水冷的情況下，对放大器进行一次光泵后，

放大器的折射率 n 由于热传导等因素，就不断地随时间演变，反映在探测光上就是探测光的波面畸变。得到波面的干涉条纹后再经 Zygo 自动分析，可得扣除总体半径后的波面随时间演变的三维照片，图 5 是其中的三张，它反映扣除了总体焦距变化之外的折射率的变化，其结果与文献[5]的结论大体相符。它说明了这种干涉仪有可能与自动条纹分析系统连用，实现波面实时处理。

2. 菲涅耳波带板干涉仪在 $1.06 \mu\text{m}$ 铍玻璃高功率激光系统波面检测中的应用研究

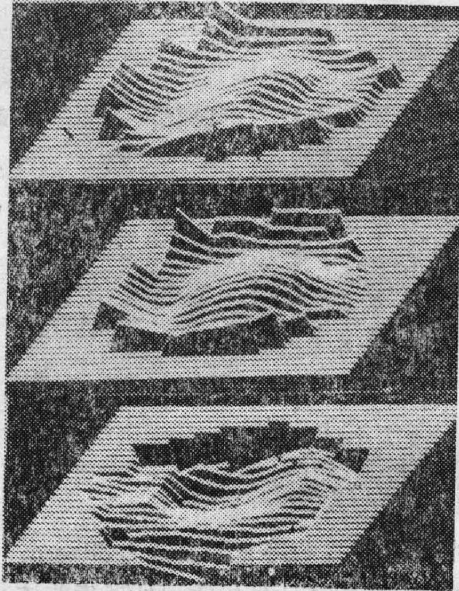


图 5 从图 4 装置得到的放大器光泵热畸变照片

Fig. 5 Results obtained from the arrangement of Fig. 4

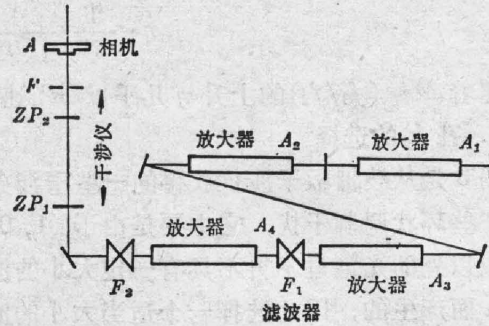


图 6 测量高功率激光器激光波面的装置

Fig. 6 Arrangement to measure high-power laser wavefront

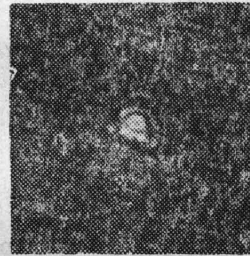


图 7 由图 6 装置得到的结果

Fig. 7 Result obtained from the arrangement of Fig. 6

图 6 是光路示意图激光系统输出光束的有效口径为 1.5 cm 左右, 脉冲时间为 10^{-9} sec, 当放电条件为 A_1 : 3400 V, A_2, A_3 : 4000 V 时, 以敏化后的胶卷感光, 摄得干涉图如图 7 所示。为确保 ZP_1, ZP_2 的一级焦点都落于小孔之内, 滤波孔的尺寸略大了些, 其直径约为 1.1 mm, 所以干涉图上的干扰噪音也比较大。观察干涉条纹的整体走向, 可见条纹在两端是微微有些散开的, 也即被测激光波面带有像散, 这和用其它方法测量所得的结论相符。

在上述放电条件下, 激光系统输出的能量为 200 mJ 左右。参予感光的能量, 按 (12) 式为 $E = 200\eta = 0.34$ mJ, 其中 η (当 $M = 6.7$ 时) 为 0.17%。底片感光面积约为 $20(\text{mm})^2$, 每平方厘米底片上接收到的能量为 1.7 mJ, 这个量距底片正常曝光量尚差一个量级 (见图 7), 但此时 ZP_2 已有损坏的迹象, 而 ZP_1 仍完好。这主要是由于 ZP_1 出射的各级衍射光干涉叠加而使 ZP_2 上部分区域的光强超过其损坏阈值而引起的。因此要寻找一种红外敏感材料以及改善波带板加工工艺及其结构, 以提高其激光损坏阈值, 这样能使波带板干涉仪更有效地对高功率激光波面进行测量。

本文工作得到本所信息组及第三研究室蔡希洁, 舒美冬, 郑玉霞同志的帮助, 在此谨表谢意。

参 考 文 献

- [1] J. C. Fouéré, D. Malacara; *Appl. Opt.*, 1974, 13, No. 9 (Sep), 2035.
- [2] P. C. Mehta *et al.*; *Appl. Opt.*, 1982, 21, No. 24 (15 Dec), 4553.
- [3] D. Malacara; *«Optical Shop Testing»*, (John Wiley & Sons, New York 1978).

- [4] E. B. Champagne; *J. O. S. A.*, 1976, **57**, No. 1 (Jan), 51.
[5] 余文炎等;《中国激光》, 1984, **11**, No. 3(Mar), 135.

Fresnel zone plate interferometer and its application in laser wavefront measurement

GU TIANQU WU SHUDONG AND YU WENYAN

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

(Received 26 March 1985; revised 29 April 1985)

Abstract

A new kind of interferometer—Fresnel zone plate interferometer—is described. It combines the advantages of both radial and lateral shearing interferometers, and thus simplifies the analysis of interferograms. This interferometer is a commonpath system. It can be used in the wavefront diagnosis of broad-band lasers and short pulse lasers. Properties of the interferometer are discussed and experimental results in laser wavefront diagnostics summarized.