

文章编号: 0253-2239(2004)10-1417-4

双剪切波面干涉测量法*

栾 竹 刘立人 刘德安 滕树云

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

摘要: 用于星间通信的激光器具有接近衍射极限的激光波面,已有的波面测量方法,在这一具体测量问题中,都存在一定限制。双剪切波面干涉测量法在雅满横向剪切干涉仪的基础上,采用四块楔形平板,将干涉图分为上下两个部分,具有不同的条纹间距,由此求出波面高度和符号,同得到单幅干涉图的其它干涉测量方法相比,它的最小可测量波高减小一倍以上。在介绍干涉仪的基本结构和原理的基础上,模拟了像差存在时的干涉图,并在实验上得到了波高为 0.3λ 的初步结果。双剪切波面干涉测量法,可以目视判断波差的符号和估计量值,为等光程相干,适用于半导体等相干长度小的光源。

关键词: 物理光学; 剪切干涉; 波面检测; 最小波面高度; 等光程相干

中图分类号: O436.1 文献标识码: A

Double-Shearing Wavefront Testing

Luan Zhu Liu Liren Liu Dean Teng Shuyun

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)

(Received 23 October 2003; revised 12 December 2003)

Abstract: Inter-satellite communication needs near diffraction-limited laser. Wavefront testing of diffraction-limited laser is difficult through several techniques reported before. Double-shearing interferometer presented here including four wedges is designed on the basis of traditional Jamin lateral shearing interferometer. The wavefront aberration can be deduced from the different fringe spacing with half minimum wavefront height of single aperture. The apparatus and principle of the interferometer are explained. Some simulations and the experiment of 0.3 wavelength wavefront height are given also. Then it is clear that with this design it is easy to know the sign of the wavefront aberration and to evaluate the value by nakedeyes. The interferometer works in the equal optical path interference which is useful for laser diode etc. with shorter coherent length.

Key words: physical optics; shearing interference; wavefront sensing; the minimum wavefront height; equal optical path interference

1 引 言

用于星间激光通信的激光器需要高质量的激光波面,此时的波高只有 0.3λ 左右,接近衍射极限。与此相应的高精度的微小波面检测,对于实现系统性能至关重要。

波面检测方法一般分为两大类^[1],一类是直接

检测,测量波面与已有标准参考面的差别。这类方法包括牛顿干涉法,迈克耳孙干涉法,斐索干涉法等。它们广泛应用于光学元件的检验,但是不适用于波面检测,因为无法方便地产生一个标准参考波面,一般为标准平面。另一类是间接检测,测量波面的斜率或相对变化,间接得出波面高度。这类方法可以用于激光波面检测和自适应光学。常见的有哈特曼类以及后来的哈特曼-夏克(Hartmann-Shack)方法,径向剪切和横向剪切干涉法等。哈特曼方法理论上精度较低^[2],剪切干涉法,通过将待测波面复制与其本身相干涉,通过干涉图判断条纹结构得出

* 国家 863 计划、上海市科学技术发展基金(012261011)、中国科学院创新课题资助课题。

E-mail: lz219025@yahoo.com.cn

收稿日期:2003-10-23;收到修改稿日期:2003-12-12

波面高度,具有较高的精度。本文的双剪切干涉仪属于横向剪切干涉类并以平板结构为基础。

测量波面的平板剪切干涉仪由 Murty^[3]提出,传统的雅满(Jamin)横向剪切干涉仪也属于此类,但是当波面高度小于一个波长,由于干涉图中得不到一对以上条纹,无法测量。楔形平板的横向剪切测量方法,由楔角提供背景条纹,通过干涉图与计算得到的理想波面应有的条纹结构比较得出波面高度,这需要精确计量楔角及理想干涉图,同时它要求光源的相干长度很长,不适用于一般星间通信中采用的半导体激光器。另外还有双楔板^[4]和分口径^[5]的方法用于准直测量,这些都无法满足星间通信激光波面测量的要求。

本文设计的双剪切波面干涉仪^[6]由两块雅敏平行平板和插入其中的四块相同的楔形平板组成,将干涉图分为上下两个部分,楔形平板的厚度提供剪切,楔角提供背景条纹,比较上下条纹间距,得出波高。不需精密仪器再调节,省去测量楔角和计算标准干涉结构,同时几乎为等光程干涉,适用于相干长度微小的光源,例如半导体激光器。本文模拟了不同像差存在时的干涉图,可以直观地看出像差的正负号,尤其对于波高小于一个波长的情况,可以通过上下条纹的差别计算波高。并在实验上得出了波高为 0.3λ 时的干涉图。

2 结构和原理

双剪切波面干涉仪结构包括两块相同的平行平板,称为雅满平板,如图 1 所示为 1 和 6,平行放置。插入的四块楔形平板完全相同,分两层叠放,其中底层楔板的长边相接,上层楔板的短边相接,如图 2 所示。

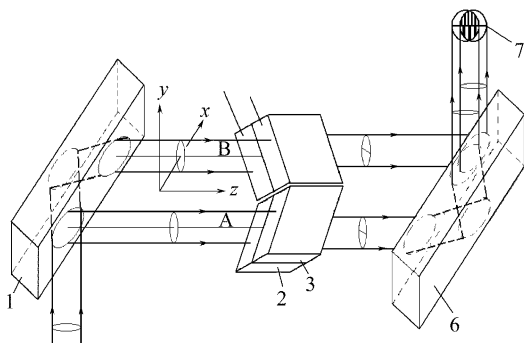


Fig. 1 Configuration of double-shearing interferometer

扩束的入射激光在雅满平板的第一表面反射,

成为光束 A,通过入射面重合的叠放楔形平板 2 和 3;激光束的另一路在雅满平板的第二表面反射,成为光束 B,通过入射面重合的叠放平板 4 和 5;这两路光束在另一块雅满平板的前后表面反射后,相干涉成上下分口径的干涉条纹。

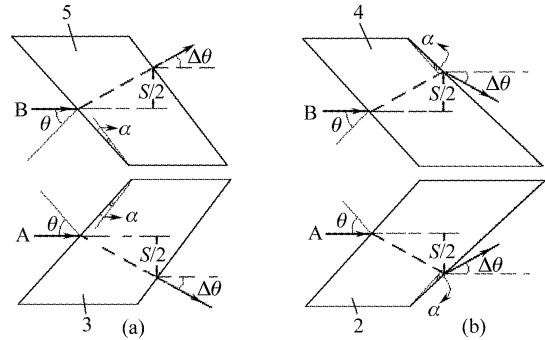


Fig. 2 Arrangement of shearing plates and routing of beams: (a) a pair on the down-half aperture (b) a pair on up-half aperture

建立如图 1 所示的坐标系,待测波面波差 $W(x,y)$ 。光束 A 和 B 经过楔形平板后,光束剪切量 $S/2$,方向改变 $\Delta\theta$,如图 2 所示。 $S/2, \Delta\theta$ 与光束入射角 θ ,楔板厚度 D ,折射率 n 之间关系分别为

$$\frac{S}{2} = d \left(\sin \theta - \frac{\sin 2\theta}{2 \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta}} \right), \quad (1)$$

$$\Delta\theta = \left(\frac{\sqrt{n^2 - \sin^2 \theta}}{\cos \theta} - 1 \right) \alpha, \quad \alpha \ll 1 \quad (2)$$

如果波面在 x 方向剪切 $\pm S/2$ 后,变为 $W(x \pm S/2, y)$ 。两干涉光束的波面波差为

$$\Delta W = W(x + S/2, y) - W(x - S/2, y), \quad (3)$$

上下条纹方程分别为

$$\begin{aligned} \Delta W + 2\Delta\theta \cdot x &= W(x + S/2, y) - \\ W(x - S/2, y) + 2\Delta\theta \cdot x &= P\lambda, \end{aligned} \quad (4a)$$

$$\begin{aligned} \Delta W - 2\Delta\theta \cdot x &= W(x + S/2, y) - \\ W(x - S/2, y) - 2\Delta\theta \cdot x &= Q\lambda, \end{aligned} \quad (4b)$$

在微小波差的情况下,波面波差可以近似为球面波, R 为光束口径半径, P, Q 为整数。

$$W(x, y) = \frac{x^2 + y^2}{R^2} W_a, \quad (5)$$

其中 W_a 为光束口径内最大波面高度,将(5)式代入(4)式,则得到条纹方程式

$$\frac{2x}{R^2} W_a S + 2\Delta\theta \cdot x = P\lambda, \quad (6a)$$

$$\frac{2x}{R^2} W_a S - 2\Delta\theta \cdot x = Q\lambda, \quad (6b)$$

如果测量得到上半干涉条纹宽度为 T_1 ,下半条纹宽度为 T_2 ,代入(6)两个方程得到波差 W_a 为

$$W_a = \lambda \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right) \frac{R^2}{4S}, \quad (7)$$

其中 λ 为激光波长, S 为剪切量。这是本干涉仪的基本测量方程。

3 模拟结果

本节将模拟标准平面, 标准球面和基本球差为待测波面时, 双剪切干涉仪的干涉图。为便于对比, 给出雅满横向剪切干涉仪的条纹方程为

$$\Delta W = W(x + S/2, y) - W(x - S/2, y) = P\lambda, \quad (8)$$

楔形平板干涉仪的条纹方程为

$$\begin{aligned} \Delta W + 2\Delta\theta \cdot x &= W(x + S/2, y) - \\ W(x - S/2, y) + 2\Delta\theta \cdot x &= P\lambda, \end{aligned} \quad (9)$$

模拟条件: 光束孔径半径 $R=15$ mm, 光源波长 $\lambda=632.8$ nm, 剪切量 $S=7.4$ mm, 楔板楔角 $\alpha=20''$ 。

3.1 波面为标准平面

1) 本干涉仪 $\Delta W=0$, 代入(4)式, 得

$$2\Delta\theta \cdot x = P\lambda, \quad (10a)$$

$$-2\Delta\theta \cdot x = Q\lambda, \quad (10b)$$

视场内为上下等宽直条纹。

2) 雅满干涉仪 $\Delta W=0$, 为均匀场, 无条纹。

3) 楔形平板干涉仪 $\Delta W=0$, 代入(9)式得: $2\Delta\theta \cdot x = P\lambda$ 为等宽直条纹。

3.2 波面为标准球面

波差表达式为公式(5)。

1) 对于本干涉仪, 条纹方程式如(6)式所示。上下条纹宽度不同, 当口径内最大波高为 0.3λ 时, 如图 3(a)所示。

2) 同样情况下, 雅满剪切干涉仪条纹方程为 $\frac{2x}{R^2}W_a S = P\lambda$ 。当口径内最大波高为 0.3λ 时, 将看不到明显条纹, 如图 3(c)所示。

3) 楔形平板干涉仪条纹方程为

$$\frac{2x}{R^2}W_a S + 2\Delta\theta \cdot x = P\lambda,$$

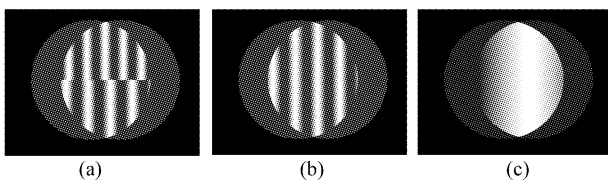


Fig. 3 The simulation pattern of (a) Double-shearing interferometer (b) wedge lateral shearing interferometer (c) plane-plate lateral shearing interferometer for spherical aberration 0.3λ

为等宽直条纹, 图 3(b)为最大波高为 0.3λ 的情况。

当目视情况下, 认为半个条纹宽度可以分辨时, 本干涉仪目视最小可测量波高 W_{amin} 为

$$W_{amin} = 0.5\lambda \frac{R^2}{4S(2R - S)}, \quad (11)$$

如果剪切量 $S = R/2$, W_{amin} 可以达到 0.2λ 。雅满剪切干涉仪口径内出现一对条纹时是最小可测量波高的情况, 即: $P = 1, x = (2R - S), (2x/R^2)S$ 取值为 1.5, 所以 W_{amin} 等于 0.67λ 。楔形平板干涉仪在目视情况下估计较为困难, 一般情况下, 在有标准参考的情况下, 最小可测量波高约为 0.4λ 。可以看出, 相同情况下本干涉仪比楔形平板干涉仪的最小可测量波高减小一半。

图 3(a)~图 3(c)分别为双剪切波面干涉仪, 楔形平板剪切干涉仪, 雅满横向剪切干涉仪在波面最大波差 W_a 为 0.3λ 时的干涉图。

3.3 理想球差情况下

被测波面只有单纯的初级球差时, 波差表达式为

$$W = \frac{(x^2 + y^2)^2}{R^4} W_a.$$

只讨论本干涉仪的情况。将此式代入(4)式, 则得到条纹方程式如下:

$$\frac{4Sx(x^2 + y^2 + S^2/4)}{R^4} W_a + 2\Delta\theta \cdot x = P\lambda, \quad (12)$$

$$\frac{4Sx(x^2 + y^2 + S^2/4)}{R^4} W_a - 2\Delta\theta \cdot x = Q\lambda, \quad (13)$$

图 4(a)~图 4(c)分别为 W_a 为 $0.3\lambda, 0.5\lambda, \lambda$ 时的干涉图。

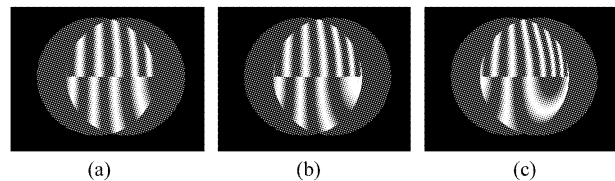


Fig. 4 The simulation pattern of double-shearing interferometer for different spherical aberration

(a) 0.3λ and (b) 0.5λ and (c) 1λ

求解球差值可以通过测量 1 级条纹与 $y=0$ 交点距离原点 $x=0$ 的距离 b , 利用以下公式:

$$W_a = \frac{\lambda \mp 2\Delta\theta \cdot b}{2Sb(b^2 + S^2/4)} R^4, \quad (14)$$

一、十号分别对应上下半孔径。可以选择方便的区域进行测量。同龙基(Ronchi)光栅的测量方法相似^[7], 对球差小于一个波长的情况下, 不同在于龙基光栅中属于不出现零级圆的情况, 测量两个量, 中心

条纹和邻近条纹在 $y=0$ 上的间距和边缘条纹的偏离。这里只要测量一个量,相对简单,而且可以通过目视直观地判断波差的正负号和估算大小。

4 实验结果

制作了测量光束口径直径最大为 40 mm 的干涉仪并取得了初步的结果。干涉仪平板采用 K9 玻璃材料。雅满平行平板均为 $140\text{ mm}\times 40\text{ mm}\times 55\text{ mm}$,楔形板厚度为 20 mm,楔角 $20''$ 。剪切量可以随楔板入射角($0^\circ\sim 45^\circ$)改变,由 0~6 mm 连续变化。实验采用波长为 633 nm 的氦氖激光器测量,光束口径直径 30 mm。

图 5(a)为实验的干涉图。测得剪切量为 7.4 mm,上下条纹宽度分别为 4.52 mm 和 5.57 mm。代入(7)式经计算波面高度为 0.3λ 波长。如果进行计算机数字处理,可以快速得出波面的其它信息,包括各种像差和精度等等。作为对比,实验还给出了单块楔板时的结果,如图 5(b)所示。

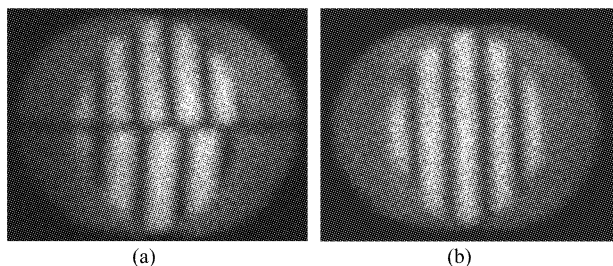


Fig. 5 Interferogram of a sphere wavefront (a) in the double-shearing interferometer and (b) in a wedge lateral shearing interferometer

结论 双剪切波面干涉仪,在微小波面波差的测量领域,具有一些优势。结构简单,易于调节;得到的结果是干涉图,一方面可以直接判断波差的符号,通过上下口径条纹的比较目视估算结果,另一方面通过干涉图的手动测量或者计算机处理,最小可探测波高比一般的单楔板剪切干涉仪减小一半,达到衍射极限。同时保证接近等光程干涉,适用于半导体激光器等相关长度短的光源,可以应用在激光通信的系统测试中。通过对像差的模拟,可以看出本干涉仪在像差的判断上,也可以由上下干涉图相比较,直观的得到一些结果,例如波差的符号和量级。进一步的计算机处理和精度的分析,可以使这一仪器更加完善,这有待进一步的工作。

参 考 文 献

- 1 Joseph M G. *Introduction to Wavefront Sensors*. Bellingham Washington: SPIE Optical Engineering Press, TT 18
- 2 Malacala D. *Optical Shop Testing*. New York: Wiley, 1978
- 3 Murty M V R K. The use of a single plane parallel plate as a lateral shearing interferometer with a visible gas laser source. *Appl. Opt.*, 1964, **3**(4): 531~534
- 4 Sirohi R S, Kothiyal M P. Double wedge plate shearing interferometer for collimation test. *Appl. Opt.*, 1987, **26**(19): 4054~4056
- 5 Lee Y W, Cho H M, Lee I W. Hhalf-aperture shearing interferometer for collimation testing. *Opt. Engng.*, 1993, **32**(11): 2837~2840
- 6 Luan Zhu, Liu Liren *et al.*. China Patent, Publication number 1421680. Double Shearing Interferometer
- 7 Briers J D. Ronchi test formulae 1. Theory. *Opt. and Laser Technol.*, 1979, **11**(4): 189~196