

文章编号: 1001-3806(2006)04-0347-04

光热干涉检测系统的实验参数选择

易亨瑜

(中国工程物理研究院 应用电子学研究所, 绵阳 621900)

摘要: 为了研究实验参数对光热干涉检测结果的影响, 根据等厚干涉测量原理, 利用赛德倾斜像差建立了相应的光热干涉测量模型。通过对探测光源的分析, 利用随机函数建立一般性光源模型, 定义了光源均匀度。在此基础上通过数值模拟, 对不同光源均匀性下实验现象进行仿真, 分析了光源均匀性对干涉测量结果的影响。分析表明, 探测光源均匀性对热吸收干涉测量结果的影响可以忽略。同时还对比分析了不同探测器接收口径对测量结果的影响。结果显示, 当探测器接收口径 $R = 0.315 \text{ cm}$ 时, 在 $0 \sim 0.6\lambda$ 的光热位移内光热信号呈单调下降, 而且条纹对比度相对较大。通过曲线拟合得到在弱吸收情况下光热信号与光热位移的一个简单经验公式。

关键词: 光学测量; 干涉; 光源均匀性; 探测器; 孔径

中图分类号: TN247 **文献标识码:** A

Experimental parameters choice of photo-thermal interferometric detection system

YH eng-yu

(Institute of Applied Electronic CAEP, Mianyang 621900, China)

Abstract In order to study influence of experimental parameters on photo-thermal interferometric detection, according to interference principle of equal thickness, a theory model is set up by means of Seidel aberration of tilt. After various probe beams are investigated, a universal light model is proposed by means of random function, and uniformity of the light source is defined. Based on this model, it is simulated that interferometric experimental phenomena change with various probe beam, and the influence of probe's uniformity is analyzed on interferometric measurement, which shows there are no difference among various probe beam. On the other hand, the influence of detector's aperture on interferometric measurement is analyzed. Results show it is the best when radius of detector's aperture is 0.315 cm . Under this condition, photo-thermal signal descends monotonously during fine scale photo-thermal displacement of $0 \sim 0.6\lambda$, and the contrast of interferometric stripe is better. Under weak absorption, a simple experiential equation between photo-thermal signal and photo-thermal displacement can be concluded by curve fitting.

Key words optical measurement; interference; uniformity of a light source; detector aperture

引 言

光热技术作为一种弱吸收检测技术, 可应用于材料吸收特性的测量研究中, 与量热法^[1]相比, 它具有无损探测等优点。光热测量方法包括干涉型^[2-4]的和非干涉型^[5-9]两大类方法, 其中干涉型检测精度较高。干涉型光热检测技术是利用薄膜在抽运光调制下, 表面热位移使探测光束产生相位畸变, 再通过光束干涉来解调位相获得光热位移。文献[2]和文献[3]中报道了标准型或双光路互补干涉的迈克尔逊干涉仪在光学元件吸收测量中的应用。利用被测样品前后表面反射的探测光束在远场形成干涉现象, 也可用于光热干涉探测^[4]。

作者简介: 易亨瑜 (1969-), 男, 博士, 高级工程师, 从事激光技术研究。

E-mail: yihengyu@ sina.com

收稿日期: 2005-06-08 收到修改稿日期: 2005-07-04

建立热吸收干涉测量装置时, 需要考虑部件的性能和价格并优化测量系统的参数配置。笔者建立了基于等厚干涉原理的光热干涉检测模型, 利用数值计算对实验现象进行仿真, 分析了测量系统的参数配置对干涉测量结果的影响。

1 光源的均匀性

实际上光源不可能是理想的平顶均匀光束, 其干涉光场中会出现常见的激光散斑现象。不同性能的测量光源, 其价格相差甚远。设由激光器出来的探测光束 $U_0 = U_{\text{uni}} + U_{\text{ran}}$, 其中 U_{uni} 为理想的平顶光束, U_{ran} 为随机噪声部分。 $\varepsilon_{0, \text{uni}}$ 表示均匀探测光束 U_{uni} 的振幅 ε_{uni} 中的最大值; $\varepsilon_{0, \text{ran}}$ 表示随机噪声部分 U_{ran} 的振幅 ε_{ran} 中的最大值, 取这两部分的位相都为平面。均匀探测光束的振幅可表示为超高斯函数:

$$\varepsilon_{\text{uni}}(x, y) = \varepsilon_{0, \text{uni}} \exp \left\{ - \left[\left(\frac{x}{r_0} \right)^n + \left(\frac{y}{r_0} \right)^n \right] \right\} \quad (1)$$

式中, $n = 3Q r_0$ 表示光束半径。 U_{un} 表示光源空间强度的起伏, 其振幅可用高斯函数平滑后的随机函数来表示: $\epsilon_{ran}(r, \theta) = \epsilon_{0ran} \exp\left[-\left(\frac{r}{r_{ran}}\right)^2\right] \odot R(Q, 1)$ (2)

式中, r_{ran} 表示光源起伏分布的空间频率, $R(Q, 1)$ 表示 0~1 之间的随机函数。 令 $\epsilon_{0ran} + \epsilon_{0uni} = 1$, 定义探测光束均匀度 $\beta = \epsilon_{un}$ 。

2 热吸收干涉检测技术

等厚干涉便于实验现象的观察和测试数据的计算机处理。 在迈克尔逊干涉仪中, 当样品镜与参考镜的等效面有一定夹角 i' 时, 就形成等厚干涉。 当夹角较小时, 等厚干涉的光程差为 $\Delta = 2nt \cos i' = 2t$, 其中 t 为等效面上对应点之间的距离。

初始探测光束 U_0 经过分束镜, 成为两束相同的光束 U_1 和 U_2 。 干涉仪器中参考镜的微小倾斜, 等效于在位相平面上叠加了一个赛德倾斜像差:

$$w_1(r, \theta) = w_{11}(r/r_{nom}) \cos(\theta - \theta_0) \quad (3)$$

式中, r 和 θ 是入瞳坐标, r_{nom} 为入瞳归一化半径, θ_0 是方位角, w_{11} 是像差系数。 利用相位屏法可得, 经过参考镜返回的探测光束 $U_1 = U_0 \exp[iw_1(r, \theta)]$ 。

抽运激光束照射在样品上, 由于光热效应, 样品内温度升高产生相位畸变。 若被测样品的径向尺寸远大于其厚度, 可视为一个均匀薄板。 在较短的时间内, 由于热还没有扩散, 若抽运光为高斯束, 则光学元件上的温度分布近似为高斯型^[10], 其引起的镜面像差也近似为高斯面型。 假设样品镜上的像差为:

$$w_2(r) = h \exp\left[-\left(\frac{r}{r_h}\right)^2\right] \quad (4)$$

式中, h 表示表面热包的高度, r_h 表示宽度。 那么经过样品镜返回的探测光束 $U_2 = U_0 \exp[iw_2(r)]$ 。

由参考镜和样品镜分别返回的探测光束, 传输距离 z_1 后达到分束镜上的光场分布:

$$\begin{cases} U_r = U_1 \odot \frac{i \exp(-ikz_1)}{\lambda z_1} \exp\left[-\frac{ik}{2z_1}(x^2 + y^2)\right] \\ U_s = U_2 \odot \frac{i \exp(-ikz_1)}{\lambda z_1} \exp\left[-\frac{ik}{2z_1}(x^2 + y^2)\right] \end{cases} \quad (5)$$

式中, \odot 为卷积运算, z_1 为参考镜或样品镜与分束镜的距离。 由参考镜返回的探测光束 U_1 , 传输距离 z_1 后变成光束 U_r 。 由经过样品镜返回的探测光束 U_2 , 传输距离 z_1 后变成光束 U_s 。 参考镜返回的光强 $I_r = U_r U_r^*$, 样品镜返回的光强 $I_s = U_s U_s^*$, f 为透镜焦距。 这两束探测器光干涉后的光强分布为:

$$I_3 = U_3 U_3^* = I_s + I_r + 2 \sqrt{I_s I_r} \cos[\varphi(t)] \quad (6)$$

式中, $\varphi(t)$ 为两反射光束间的相位差。 合束后的探测光再传输距离 z_1 达到透镜, 通过透镜后为:

$$U_4 = U_3 \odot \frac{i \exp(-ikz_1)}{\lambda z_1} \exp\left[-\frac{ik}{2z_1}(x^2 + y^2)\right] \times \exp\left[-\frac{ik}{2f}(x^2 + y^2)\right] \quad (7)$$

到达探测器上的光场分布:

$$U_5 = U_4 \odot \frac{i \exp(-ikz_2)}{\lambda z_2} \exp\left[-\frac{ik}{2z_2}(x^2 + y^2)\right] \quad (8)$$

式中, z_2 为透镜与探测器的距离。 在探测光束的中心位置前, 放置一个带针孔的快响应弱信号探测器, 定义光热信号为探测光中心处的强度变化:

$$P = \int_0^R U_5 U_5^* 2\pi r dr \quad (9)$$

式中, P 为探测光中心强度, R 为探测器的接收口径。

3 模拟计算及分析

取 $z_1 = z_2 = 20\text{cm}$, $f = 10\text{cm}$, $\lambda = 0.6328\mu\text{m}$, $\epsilon_{0un} = 1.8 \times 10^{-4}$, $r_0 = 0.5\text{cm}$, $r_{ran} = 1.8 \times 10^{-4}\text{cm}$ 。 不同的探测光束的振幅见图 1。 取 $w_{11} = 2\lambda$ 参考镜上返回的探测光束 U_1 的位相见图 2a。 取 $h = \lambda$, $r_h = 0.5\text{cm}$ 样品

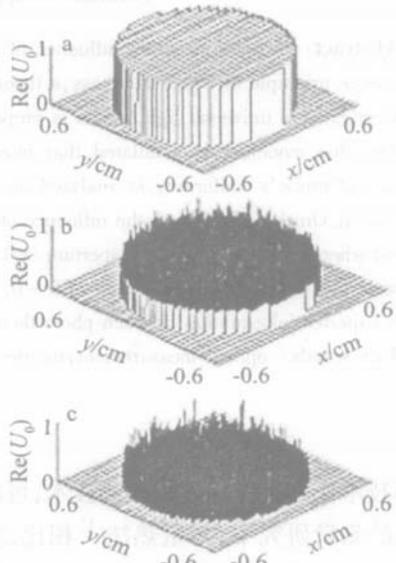


Fig. 1 The amplitudes of various probe beam a- $\beta=1$ b- $\beta=0.3$ c- $\beta=0$

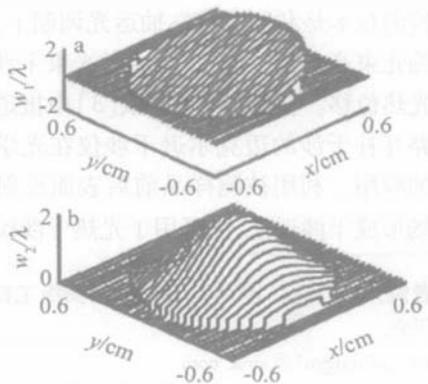


Fig. 2 Different phases of probe beams a- on the reference mirror b- on sample mirror

镜上返回的探测光束 $U_2 = U_0 \exp[i2v_2(r)]$, 其位相见图 2b。

抽运光束对样品的照射, 产生的光热效应导致两反射探测光束之间的光程差发生变化, 引起干涉场中

条纹的移动。取探测器小孔半径 $R = 0.045\text{cm}$, 光热位移的增量 $\Delta = 0.025\lambda$ 。对于 $\beta = 1$ 的均匀探测光束, 数值模拟得到不同光热位移量下的干涉条纹图, 如图 3 所示。

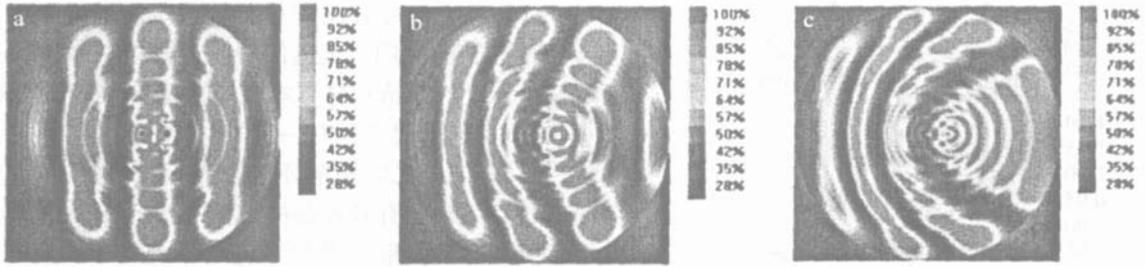


Fig 3 Interferometric stripes of various photo thermal displacement
a— $h = \Delta$ b— $h = 16\Delta$ c— $h = 36\Delta$

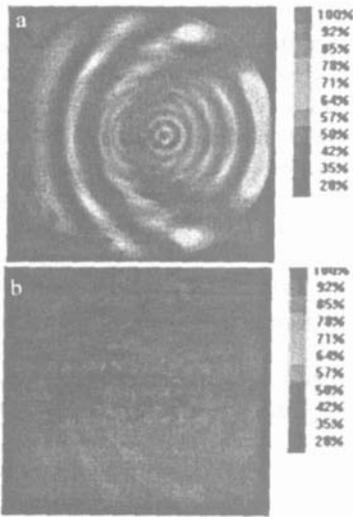


Fig 4 Interferometric stripes of various probe beam at $h = 36\Delta$
a— $\beta = 0.3$ b— $\beta = 0$

更换光源得到干涉条纹图, 见图 4。可以看到, 抽运光引起的样品镜面的光热位移, 其干涉条纹不是平行移动, 而呈现出条纹中心移动导致的弯曲变形。在图 3 和图 4 中具有相同的峰值光强的探测光源, 因输出功率不同而使干涉条纹的明暗程度出现差异。

利用小孔探测器接收光热信号得到图 5。可以看到, 测量信号随光热位移量呈周期性变化, 其峰值逐渐减少; 不同光源下探测信号的峰谷值之比都约为 6。由上分析可得, 探测光源均匀性对热吸收干涉测量结果的影响可以忽略。这样在建立测量装置时, 可以选择价格适宜的激光器作为测量光源。

图 5 还显示, 未加入抽运光时的信号并非最大值, 即光热信号在第一个半周期内与光热位移不是一一映射关系, 这会给测量结果的数据处理引起混淆。在以上分析中, 探测器小孔尺寸 R 约为条纹宽度。

增大探测器小孔尺寸, 得到图 6 所示的不同接收口径下光热信号随光热位移的变化趋势。该图显示, 当探测器接收口径 $R = 0.315\text{cm}$ 时, 在第一个半周期内, 光热探测器信号随光热位移的增大呈单调下降, 而

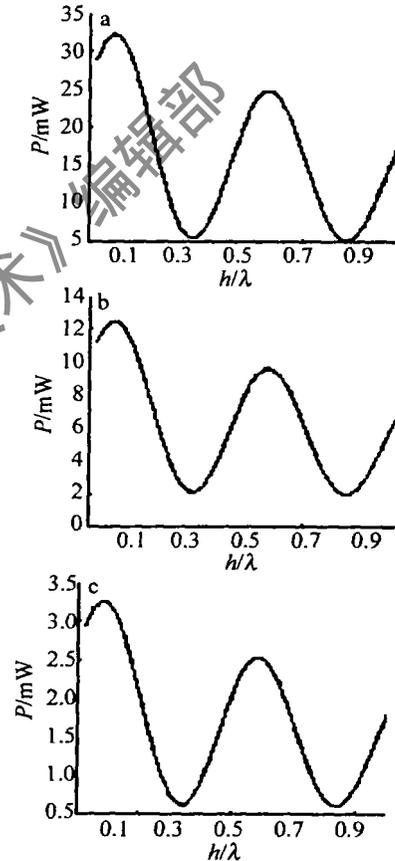


Fig 5 Changes of signal with thermal displacement of different probes
a— $\beta = 1$ b— $\beta = 0.3$ c— $\beta = 0$

且条纹对比度相对较大, 此时峰-谷值之比为 1.4085, 对测量有用的是第一个半周期内的光热信号。如图 7a 所示, 当 $R = 0.315\text{cm}$ 时, 用最小二乘法进行曲线拟合得到:

$$P = -0.2122h^3 - 0.4527h^2 + 0.0328h + 0.6357 \quad (10)$$

对图 7a 的纵坐标进行归一化, 得到图 7b, 用经验法进行曲线拟合得到:

$$P = \exp\left[-\frac{(\pi h)^2}{14}\right] \quad (11)$$

相比之下, 经验法拟合的 (11) 式相对简单, 便于实际应用。实验测量中需要测量的最大光热位移约为

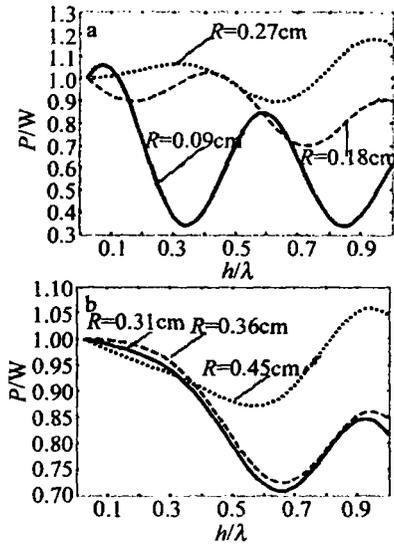


Fig 6 Photo-thermal signals of various detector's calibers

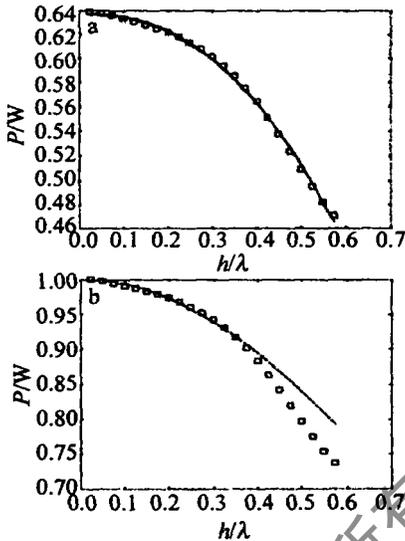


Fig 7 Fitting of photo-thermal signals at $R=0.315\text{cm}$
a—method of least squares b—method of experience

$0.3\mu\text{m}^{[5]}$, 由图 7b 可以看到, 当光热位移在 $0\sim 0.6\lambda$ (即 $0\mu\text{m}\sim 0.3\mu\text{m}$) 范围内经验公式近似成立。

4 小结

建立了光热干涉检测模型, 利用数值仿真对实验现象进行模拟, 分析了光源均匀性、探测器口径对干涉测量结果的影响。分析表明, 探测光源均匀性对热吸

收干涉测量结果的影响可以忽略。探测器接收口径不同, 直接影响了光热信号在第一个半周期内曲线特性和信号对比度。结果显示, 当探测器接收口径 $R=0.315\text{cm}$ 时, 在第一个半周期内, 光热信号呈单调下降, 而且信号对比度相对较大。曲线拟合得到在小信号光热位移下, 光热信号与光热位移的关系近似为 $P = \exp[-(\pi h)^2/4]$ 。本文中的研究结论对光热干涉检测系统的建立具有一定的指导作用。

若实际光学测量环境较差, 可考虑采用菲索干涉仪装置, 它能有效抑制机械振动、空气流动等环境噪声的影响, 其测量结果受环境的影响较小。该分析也适用于这类装置光热检测的分析中。

参考文献

- [1] WEI H Zh, LI J R Measurement of optical component absorption [J]. Laser Technology, 1999, 23(5): 284~287 (in Chinese).
- [2] ZHANG Zh J A new method for the study of optical and thermal properties of surfaces: photo-thermal displacement spectroscopy [J]. Acta Photonica Sinica, 1996, 25(7): 585~588 (in Chinese).
- [3] YIN Q R, WANG L, QIAN M L Photoacoustic photo-thermal technology and its applications [M]. Beijing Science Press, 1999, 176~180 (in Chinese).
- [4] LI B Ch, DENG Y Zh, CHENG J K. A novel interferometric detection scheme for photo-thermal measurements [J]. Chinese Journal of Lasers, 1997, 24(12): 1085~1089 (in Chinese).
- [5] HU H Y, FAN Zh X, ZHAO Q. Measuring weak absorptance of thin film coatings by surface thermal lensing technique [J]. Acta Optica Sinica, 2001, 21(2): 150~154 (in Chinese).
- [6] WANG Y J, HU H Y, LI Q G *et al*. Study of weak absorption of the thin films coated on the Si plates [J]. Chinese Journal of Lasers, 2001, A28(10): 937~940 (in Chinese).
- [7] YANG F, HUANG W, ZHANG B *et al*. Temperature field distribution and thermal distortion of thin film coatings irradiated by CO_2 laser [J]. Laser Technology, 2004, 28(3): 255~258 (in Chinese).
- [8] YANG F, HUANG W, ZHANG B *et al*. Measurement of weak absorption of thin film coatings irradiated by $10.6\mu\text{m}$ laser [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2004, 16(3): 277~280 (in Chinese).
- [9] JING T J, HUANG W, QI W Z *et al*. Thin film weak absorption of $3.8\mu\text{m}$ and $2.8\mu\text{m}$ laser measured by surface thermal lensing technique [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2004, 16(12): 1497~1500 (in Chinese).
- [10] POWER J F. Pulsed mode thermal lens effect detection in the field via thermally induced probe beam spatial phase modulation: a theory [J]. Appl Opt, 1990, 29(1): 52~63.