

一种新的多波长数字散斑干涉技术

彭 翔 姚建铨

(天津大学精密仪器工程系, 天津 300072)

摘 要 研究了一种新的多波长数字散斑干涉技术, 并证明了这种技术应用于分析复杂几何形貌表面的可能性.

关键词 二极管激光器, 波长调谐, 散斑干涉, 表面形貌分析.

1 引 言

利用传统双波长电子散斑干涉技术分析表面形貌的依据是使待测表面与一个用光学方法产生的标准匹配波面相比较. 对于简单几何形状的表面, 例如平面、球面或柱面, 可以用普通光学元件来产生匹配波前. 而对于更复杂的表面几何, 则必须用全息的方法来产生所需要的标准匹配波前^[1]. 可见, 用这种方法分析几何形貌复杂的表面在实际应用上受到很大限制. 此外, 传统电子散斑干涉系统的光路结构有一个基本条件是: 标准匹配波前的会聚点必须位于观察透镜的光瞳中心, 参考光的发散点与标准匹配波前的会聚点共轭^[2]. 如果这种“共轭”条件不满足, 则会使描述待测表面与标准匹配波面形状差异的散斑相关条纹带来误差.

本文提出一种新的多波长散斑干涉技术, 并证明这种技术用于分析表面形貌不是依据待测表面与匹配波面比较, 而是直接进行分析测量. 因此, 无论对于简单的或复杂的表面几何都无需产生标准匹配波前. 此外, 本文研究的光学系统去掉了传统方法中的“共轭条件”, 这使光路调整大为简化. 这种多波长散斑干涉技术采用半导体激光器作为光源, 利用其波长可调谐性质可以获得不同灵敏度的散斑等高相关条纹.

2 原 理

光学系统如图1所示. 输入照明光被分光镜 BS_1 分成参考光和物光两路, 然后在分光镜 BS_2 重新会合. 在调整光路时, 使参考光与物光重新会合与成像系统的光轴重合, 并使所研究的物表面被一个正向入射的物光照明. 散射体 G 用来产生散斑参考光. 这个光路结构对参考光和物光均无“共轭条件”的要求.

假定 P 是一个任意的垂直于成像系统光轴的参考平面, 不妨设 P 是跨越物体表面顶点并与像面平行的平面. 挡住参考光时, 物表面一点 $r_0(x, y)$ 的光波到达像面轭点 $r_s(x', y')$ 的相

位 $\phi_0(\mathbf{r}_d)$ 由下式给出:

$$\phi_0(\mathbf{r}_d) = (2\pi/\lambda)[l_1 + 2l_2 + l_3] + \phi_{os}(\mathbf{r}_d) + (4\pi/\lambda)h(\mathbf{r}_0) \quad (1)$$

式中 l_1 为物光从 BS_1 到 BS_2 的光程, l_2 为 BS_2 到参考平面 P 的距离, l_3 为分光镜 BS_2 到像面的光程. $\phi_{os}(\mathbf{r}_d)$ 表示 \mathbf{r}_d 点处的散斑相位. $h(\mathbf{r}_0)$ 表示物表面上一点 $\mathbf{r}_d(x, h)$ 相对参考平面的高度. 参考光在像面同一点 \mathbf{r}_d 的相位 $\phi_r(\mathbf{r}_d)$ 可写成

$$\phi_r(\mathbf{r}_d) = (2\pi/\lambda)[l_{r1} + l_3] + \phi_{rs}(\mathbf{r}_d) \quad (2)$$

式中 l_{r1} 为参考光从分光镜 BS_1 到分光镜 BS_2 之间的光程; $\phi_{rs}(\mathbf{r}_d)$ 为散斑参考光像面上 \mathbf{r}_d 点的随机相位. 在傍轴近似条件下, (1) 式和 (2) 式中的相位 $(2\pi/\lambda)[l_1 + 2l_2 + l_3]$ 和 $(2\pi/\lambda)(l_{r1} + l_3)$ 可视为常数, 并分别记为 ϕ_{oc} 和 ϕ_{rc} . 由光学上粗糙的物

表面^[2]产生的散斑场与散斑参考光在像面干涉形成干涉散斑场, 其复振幅 $U(\mathbf{r}_d)$ 为

$$U(\mathbf{r}_d) = U_0(\mathbf{r}_d) + U_r(\mathbf{r}_d) = |U_0| \exp \{j\phi_0(\mathbf{r}_d)\} + |U_r| \exp \{j\phi_r(\mathbf{r}_d)\} \quad (3)$$

$$\phi_0(\mathbf{r}_d) = \phi_{oc} + \phi_{os}(\mathbf{r}_d) + (4\pi/\lambda)h(\mathbf{r}_0), \quad \phi_r(\mathbf{r}_d) = \phi_{rc} + \phi_{rs}(\mathbf{r}_d).$$

于是像面干涉散斑场的强度为

$$I(\mathbf{r}_d) = I_0 + I_r + 2 \sqrt{I_0 I_r} \cos [\phi + \phi_s + (4\pi/\lambda)h(\mathbf{r}_d)] \quad (4)$$

$$\phi = \phi_{oc} - \phi_{rc}, \quad \phi_s = \phi_{os} - \phi_{rs}$$

式中 I_0 和 I_r 分别为像面干涉散斑场的物光和参考光的平均强度. 当采用波长可调谐激光器作为光源时, 选择其中一个波长照明产生的干涉散斑场作为参考光, 然后变换波长, 构成不同间隔的波长, 从而获得不同灵敏度的散斑等高相关条纹. 对于任一波长对, (4) 式可写成

$$I_i(\mathbf{r}_d) = I_{oi} + I_{ri} = 2 \sqrt{I_{oi} I_{ri}} \cos [\phi_i + \phi_{si} + (4\pi/\lambda_i)h(\mathbf{r}_0)] \quad i=1,2 \quad (5)$$

当不同的波长对照明物表面所产生的两个像面干涉散斑场具有足够好的相关性时, 可以假设物光和参考光的平均强度近似保持不变, 而且干涉场的散斑相位也近似保持不变, 即, $I_{o1} \cong I_{o2} = I_0$, $I_{r1} \cong I_{r2} = I_r$, $\phi_{s1} \cong \phi_{s2} = \phi_s$. 对大量的散斑求平均, 则相关条纹与显示器上的亮度信号 $\langle (I_1 - I_2)^2 \rangle$ 成正比^[1]. 由 (5) 式可知

$$I_1(\mathbf{r}_d) - I_2(\mathbf{r}_d) = 4 \sqrt{I_0 I_r} \sin [\alpha + \phi_s(\mathbf{r}_d) + (4\pi/\Sigma)h(\mathbf{r}_0)] \sin [\beta + (4\pi/\Gamma)h(\mathbf{r}_0)] \quad (6)$$

$$\alpha = (\phi_1 + \phi_2)/2, \quad \beta = (\phi_1 - \phi_2)/2, \quad \Gamma = \lambda_1 \lambda_2 / (\lambda_1 + \lambda_2)$$

式中 Γ 称为等效波长, 并由它定义多波长散斑干涉技术的灵敏度. (6) 式中的第一个正弦函数是一个具有随机相位的高频振荡, 经过求集平均运转后这项将消失. 另外, 可假设 $\phi_1 = \phi_2$ 或 $\beta = 0$ 而不失一般性. 于是, 显示器上的亮度信号具有如下形式

$$B = \langle (I_1 - I_2)^2 \rangle = 8 [I_0] \langle I_r \rangle \sin^2 [(4\pi/\Gamma)h(\mathbf{r}_0)] \quad (7)$$

在推导 (7) 式时, 作者假定了 I_0 与 I_r 统计独立, 随机相位 ϕ_s 与干涉散斑场的强度涨落统计独立, 并且 ϕ_s 是一个均匀分布的随机变量. 由 (7) 式可见, 随着表面几何的高度变化, 亮度值在 0 和 $8 \langle I_0 \rangle \langle I_r \rangle$ 之间波动. 光 $h(\mathbf{r}_0)$ 的变化量为 $\Gamma/2$ 时, 则可观察到暗条纹, 这种散斑等高条纹表征了表面形貌对于参考平面的高度偏离程度. 等高条纹的间距为 $\Gamma/2$, 它取决于所选择的

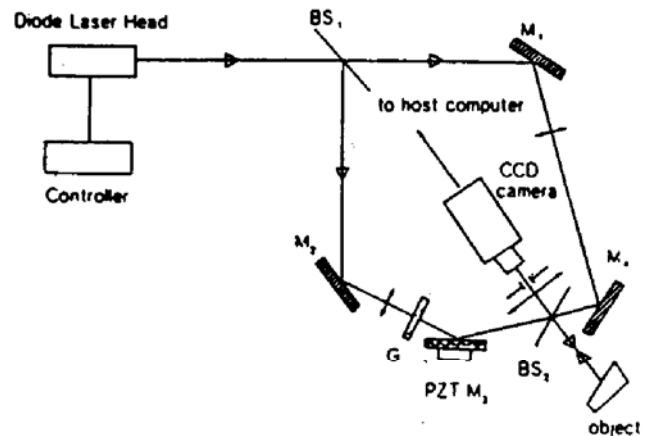


Fig. 1 Optical arrangement

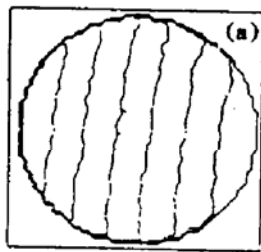
两个波长之差: $\Delta\lambda = \lambda_1 - \lambda_2$. 当光源的波长连续可调时, 则可以获得不同灵敏度的等高条纹. 应该指出: 在推导(7)式的过程中, 没有对表面高度变化 $h(r_0)$ 的具体形式做任何规定, 因此, (7)式适用于各种简单的和复杂的表面几何.

3 实 验

实验光路如图 1 所示. 光源由 30 mW 二极管激光器 (Melles Griot 06 DLL407) 和控制器 (LDC 700A) 组成. 对于这样光源系统, 通过调节二极管激光器的温度控制单元, 可以在 20°C 到 27°C 的范围内获得波长从 781.660 nm 到 782.192 nm 的线性变化的单模输出^[3]. 其单位温度变化所对应的波长差为 0.08 nm/°C. 选择参考照明波长 λ_1 为 781.660 nm, 另一个照明波长 λ_2 在上述线性区域里选择就可以构成灵敏度从 0.57 mm 到 3.8 mm 的变化范围.

接收和处理系统由 F - 数为 40 的成像透镜, CCD 摄像机 (PULNIX TM-745), 图像帧存储器 (FG-100) 及计算机组成. 分别用波长 λ_1 和 λ_2 照明被测表面. 首先用图像帧存储器记录由 λ_1 产生的干涉散斑场, 然后调节温度控制单元, 使波长改变为 λ_2 并记录相应的干涉散斑场. 将两幅在帧存储器中的散斑图进行数字相减及求平均等运算, 即可得到散斑等高相关条纹. 相关条纹由计算机控制在显示 (SONY PVW-122 CE) 上显示. 为了获得表面形貌的定量数据, 可以对散斑相关条纹图使用相移算法^[4,5]. 相移由计算机通过接口 (DT2801) 控制压电传感反射镜 M_3 引入. 先根据相移算法由三幅移相的散斑相关条纹图计算出位相分布, 然后利用下式

$$h(x', y') = \frac{\Gamma}{4\pi} \phi(x', y')$$

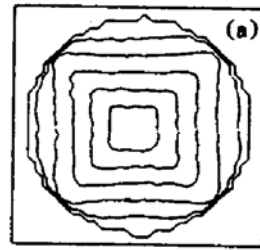


(a) contour map



(b) 3-D plot

Fig. 2



(a)



(b)

Fig. 3

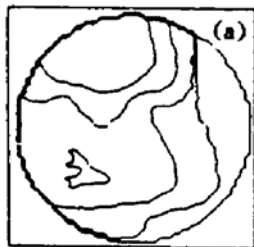


Fig. 4

计算出被测表面的几何形貌. 上式中的 $\phi(x', y')$ 是散斑相关条纹图的位相分布. 根据上述实验原理和系统, 本文对三种不同几何形貌的表面进行了分析. 这三种表面分别是: 斜平面, 四棱体表面和一个形貌更为复杂的表面. 实验结果由图 2 至图 4 给出. 其中 (a) 系列图分别描绘了表面形貌的等高线图; (b) 系列图分别表示相应于被测表面几何形貌的三维显示图. 这些实验结果证明, 本文研究的多波长数字散斑技术对于分析复杂表面

几何形貌是有效的.

4 结 论

本文从理论上和实验上证明了一种新的数字散斑干涉技术. 这种技术应用于分析表面的几何形貌具有若干优点: (1) 无论对于简单或复杂的表面形貌, 都无需附加光学元件或全息图来产生匹配波前, 这使光路系统和测量过程都因此而简化. (2) 对物波和参考波均无“共轭条件”限制, 因而光路的调整比较容易; (3) 用二极管激光器和其控制器组成的光源可以获得用氨离子激光器或可调谐染料激光器作光源时得不到的灵敏度范围; (4) 将自动条纹分析技术引入该系统可以获得表面形貌的定量数据. 有关此技术的测量精度和误差分析的详细讨论, 将另文报道.

作者感谢与 Hans J. Tiziani 教授的有益讨论以及 Stuttgart 大学技术光学研究所提供的实验设备.

参 考 文 献

- [1] R. Jones, C. Wykes, *Holographic and speckle interferometry.*, Cambridge U. P. London 1983
- [2] R. Jones, C. Wykes, The comparison of complex object geometry using a combination of electronic speckle pattern interferometric difference contouring and holographic illumination elements. *Optica Acta*, 1978, **25**(6): 449~472
- [3] X. Peng, Y. L. Zou, H. Y. Diao *et al.*, A simplified multi-wavelength ESPI contouring technique based on a diode laser system. *Optik*, 1992, **91**(2): 81~85
- [4] K. Creath, Phase-shifting speckle interferometry. *Appl. Opt.*, 1985, **24**(8): 3053~3958
- [5] D. W. Robinson, D. C. Williams, Digital phase stepping speckle interferometry. *Opt. Commun.*, 1986, **57**(1): 26~30
- [6] Y. Ishii, R. Onodera, Two-wavelength laser-diode interferometry that uses phase-shifting techniques. *Opt. Lett.*, 1991, **16**(19): 1523~1525

A New Type of Multi-Wavelength Digital Speckle Pattern Interferometry

Peng Xiang Yao Jianquan

(Department of Precision Instrumentation Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072)

(Received 28 September 1992; revised 23 November 1992)

Abstract A new type of multi-wavelength digital speckle pattern interferometry is studied, and the possibility of analyzing complex surface geometry by using such a technique is also demonstrated.

Key words diode laser, wavelength modulation, speckle interferometry, surface geometry analysis.