

高灵敏度的多波长多光束干涉仪

吴宝根

(中国科学院力学研究所, 北京, 100080)

摘要: 作者用多纵模 He-Ne 激光照明多光束 Fabry-Perot 或 Fizeau 干涉仪, 在一个自由光谱范围内, 形成与不同波长对应的子条纹, 相邻条纹间的间隔代表的波长数依赖于 He-Ne 激光腔的光学长度 $n_p L$ 与 F-P 腔长 nd 之比 $r = nd/n_p L$ 。当 r 是整数时, 不同波长对应的相邻干涉级次相互重叠, 条纹间隔为 $\lambda/2$ 且强度最大; 当 r 是分数时, $r = N/M$, N, M 为互质的整数, 相邻条纹之间间隔为 $\lambda/2M$ 。不难做到 $M = 10$, 条纹间隔为 $\lambda/20$ 。由于多光束干涉条纹细而锐, 有利于读数精度提高, 可以测量 $\lambda/500$ 的程差变化, 不需内插就可以给出空间分布的足够信息。这对光学元件的高精度面形检验及低密度流场显示有实际的应用前景。给出了应用的若干例子。

关键词: 多光束干涉 流场测量 光学元件检验

High sensitivity multiple beam interferometry

Wu Baogen

(Institute of Mechanics, Academia Sinica, Beijing, 100080)

Abstract: It is shown that a Fabry-Perot interferometer with small wedge angle or a Fizeau interferometer is illuminated by a collimated multiple longitudinal mode He-Ne laser beam, the spacing of adjacent fringes depends on the ratio $r = d/L$, here d and L are the length of the interferometer and laser cavity. When r is a integral, the different order fringes corresponding to different modes are overlapped and the intensity of fringe is maximum and the fringe spacing represents $\lambda/2$. When r is fraction, $r = N/M$, N and M are both prime numbers, the fringe spacing is corresponding to λ/M . It is easy to get $M = 10$ for a long cavity He-Ne laser, the interferometric sensitivity is then 10 times that of M -Z interferometer. This interferometer can be applied to examining of the optical components with high precision and the measurement of low flow field. Some applications are presented in this paper.

Key words: multiple beam interferometer flow field visualization optical component test

三、结 论

1. 深熔激光焊接中焊缝熔深存在着振荡频率约为 30Hz ~ 40Hz 的振荡。
2. 用解析法对熔池形状的模拟结果与实验结果基本吻合。

参 考 文 献

- 1 Schuocker D, Kaplan A. SPIE, 1994; 2207: 236 ~ 247
- 2 Carslaw H S, Jaeger J C. Conduction of heat in solids. Oxford University Press 2nd, ISBN0-19-853368-3, Oxford, Great Britain; Oxford Univ. Press, 1959

作者简介: 骆红, 女, 1966 年出生。讲师。现从事激光焊接质量监控及熔池模拟方面的研究。

收稿日期: 1996-06-05 收到修改稿日期 1996-09-17



一、引 言

光学干涉计量是以光波波长为单位测量光学元件、工件表面或光通过相位体后引起的光程变化的一种精密测量方法。随着光学产品质量的提高和在某些领域内小程差测量要求,干涉仪的精度和灵敏度的要求也愈来愈高,在许多情况下,通常的干涉仪的灵敏度显得太低。

精度和灵敏度是互相有关但又两个不同的概念。以最常用的 Mach-Zehnder (M-Z) 干涉仪为例,定义干涉仪的绝对灵敏度为光波波阵面变形的放大倍数,即条纹位移与波阵面变形之比 $S = p / T = p / x$ [1], p 是条纹位移量, p 是参考条纹之间间距, T 是待测的光程差, x 是相邻条纹对应的波长数。对给定的波长,加宽参考条纹宽度,可以提高灵敏度。如调成无限宽条纹,灵敏度无限大。这似乎不太合理。因为在可用的视场内,光场强度分布均匀,小程差的测量变成光强分布测量问题,这类似于阴影和纹影中测量一样,测量精度不可能很高。但由此定义给我们一些有益的启示:条纹宽度 p 的读数精度决定了干涉仪的测量精度,而真正要提高干涉仪的灵敏度必须减少相邻条纹间隔代表的波长数。对双光束干涉,条纹强度为正弦分布,在峰谷处强度变化斜率小,这给峰谷位置的确定带来困难。因此,加宽参考条纹宽度是以牺牲读数精度为代价的。事实上,在实际应用中一般在视场内调成二条条纹是合适的。因此,灵敏度也就受到限制。如果定义干涉仪的相对灵敏度 $S_{rel} = p / p' / T = 1 / x$, 则与参考条纹宽度无关,只与条纹宽度对应的波长数有关,真正反映灵敏度的概念。如 M-Z 干涉仪, $x = 1$, 而 Michelson 干涉仪, $x = 1/2$, 灵敏度是 M-Z 干涉仪的二倍。本文将证明用多纵模 He-Ne 激光照明 Fabry-Perot 干涉仪,适当选择 F-P 干涉仪两镜间的间距,可以使 $x = 1/10$, 灵敏度是 M-Z 干涉仪的 20 倍。

二、工 作 原 理

以单色准直光垂直照明的 F-P 或 Fizeau 干涉仪,干涉条纹的强度分布近似于 Airy 分布,规一化透射光强为

$$I_t / I_0 = 1 / (1 + F \sin^2 \delta / 2) \tag{1}$$

$$F = 4R / (1 - R)^2 \tag{2}$$

式中, δ 是光在两镜片之间来回行走一周引入的相位移, R 是镜面的强度反射率。图 1 表示对不同反射率规一化透射强度与程差变化的关系。反射率越高,条纹越尖锐,读数精度也就越高。

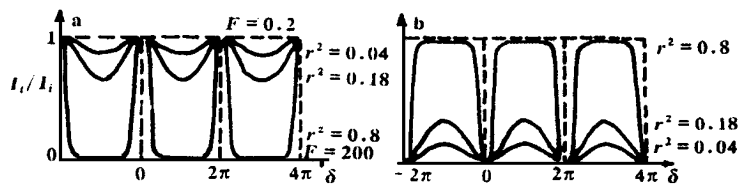


Fig. 1 The normalized intensity distribution of multiple beam interference (a) →transmitted (b) →reflected

当 $\delta / 2 = knd = m$ 时,即 $2nd = m$ (3)

规一化透射强度等于 1,此处 m 是干涉级次,它是一个很大的数目。如果两镜面是理想的,镜间介质的折射率是常数,则透射光是一均匀场,大多数情况下是暗场;如果镜面不理想,由条纹图样可给出镜面面形的等高轮廓线分布。

$$d(x, y) = m(x, y) / 2n \tag{4}$$

如果 d 保持不变,而 n 变化,则由干涉方程 $\int_0^d n(x, y, z) dz = m(x, y) / 2$ (5)

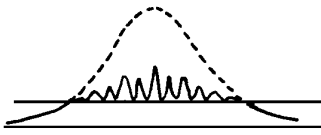


Fig. 2 The longitudinal modes of a He-Ne laser under Doppler gain profile

1。各个纵模的强度分布如图 2。若写成波长间隔 $\lambda_0, \lambda_0 + \Delta\lambda, \lambda_0 + 2\Delta\lambda, \dots$ 表示各个纵模的波长, λ_0 是中心波长。为推导各纵模形成的条纹位置与中心波长 λ_0 的条纹位置之间的关系,我们假定两干涉镜之间有一小倾角 $\epsilon = \Delta\lambda / 2n_p$, p 是中心波长 λ_0 的条纹间隔。并假定倾角如此之小,不引起条纹的明显加宽和不对称,在 A 点处的光线的程差正好是 λ_0 的整数倍,如图 3,并满足方程(3)。对 $\lambda_1 = \lambda_0 + \Delta\lambda$ 波长,峰值条纹位置在离 A 点 x_p 处, x 是一分数。由于干涉方程

$$2n(d + x\lambda_0/2n) = (m - q)(\lambda_0 + \Delta\lambda) \tag{8}$$

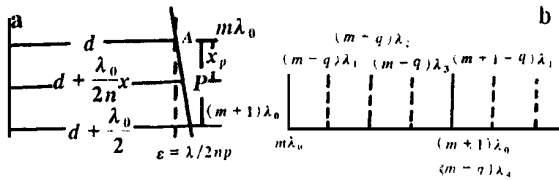


Fig. 3 a—the fringe location for different modes
b—fringes overlapped for $d/L = 1/4$

$d/L = 1/3, 2/3, 4/3 \dots$ 时,条纹间隔为 $\lambda_0/6$ 。以此类推,不难得到,只要 $d/L = N/M$ 是分数,且 M, N 是互质的整数,则条纹间隔为 $\lambda_0/2M$ 。因此,干涉仪的灵敏度是 M-Z 干涉仪的 $2M$ 倍。这为小程差测量提供极其简单的方法。

三、实验演示

多光束干涉的实验演示装置如图 4。由三部分组成: He-Ne 准直光源,干涉仪和记录设备。

准直光源用腔长 1.2m 的多模 He-Ne 激光器,经扩束空间滤波,再由口径 250mm 有象差补偿的折反式纹镜仪准直镜输出平行光,垂直入射到 M_1 。为保证垂直入射,调节 M_1 使从 M_1 反射回的光又回到滤波针孔上。干涉镜 M_1, M_2 都用磁性表座固定在防震平台上,两镜间距可任意调节,其中镜子 M_2 装在一精密可调的小平台上,精确调节两镜间距离。干涉图经透镜 L_2 成象在照相干板或成象在 CCD 象机的敏感元件上,用象机记录或经计算机直接显示在屏幕上。透镜 L_2 的物平面一般在 M_1, M_2 两镜的中间平面或被测相位体的中间平面上,以减少由于光折射产生的误差。

我们做了以下实验:

(1) 改变 d , 使 $d/L = 1/2, 1/3, 2/3, 1/4, 3/4 \dots$, 看参考条纹间隔变化的情况。因在所

可以求出折射率分布,再利用折射率与密度之间的关系,可以测量气体的密度、温度或成分变化等物理量的分布。

现在用多纵模 He-Ne 准直激光垂直照明,因为 He-Ne 激光的 Doppler 加宽形线宽度约为 1500MHz,谱线间隔及谱线数目决定于谐振腔的腔长 L ,频率间隔为

$$= c/2Ln_p \tag{6}$$

式中, n_p 是 He-Ne 放电管内等离子体的折射率,近似等于 1。各个纵模的强度分布如图 2。若写成波长间隔 $\lambda_0, \lambda_0 + \Delta\lambda, \lambda_0 + 2\Delta\lambda, \dots$ 表示各个纵模的波长, λ_0 是中心波长。为推导各纵模形成的条纹位置与中心波长 λ_0 的条纹位置之间的关系,我们假定两干涉镜之间有一小倾角 $\epsilon = \Delta\lambda / 2n_p$, p 是中心波长 λ_0 的条纹间隔。并假定倾角如此之小,不引起条纹的明显加宽和不对称,在 A 点处的光线的程差正好是 λ_0 的整数倍,如图 3,并满足方程(3)。对 $\lambda_1 = \lambda_0 + \Delta\lambda$ 波长,峰值条纹位置在离 A 点 x_p 处, x 是一分数。由于干涉方程

式中, q 是等于或大于 0 的整数。因为 $\Delta\lambda \ll \lambda_0$, 由方程(3), (7), (8) 容易解得:

$$x + q = nd/n_pL = d/L \tag{9}$$

如果 d/L 等于 1 或任意整数,则 $x = 0$, 各纵模对应的条纹互相重叠,条纹强度最大;当 $d/L = 1/2, 3/2, 5/2 \dots$ 时,相邻纵模对应的条纹间隔均为 $\lambda_0/4$; 当

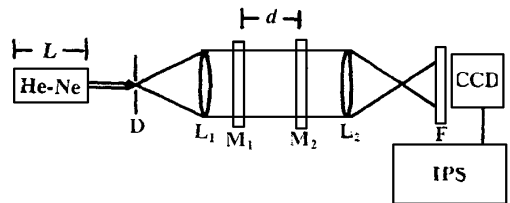


Fig. 4 A set-up of multiple beam interferometer

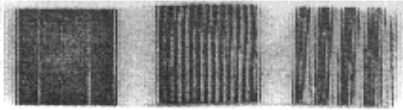


Fig. 5 The fringe patterns of $d/L = 1/2, 1/4, 1/10$ for He-Ne laser with $L = 120\text{cm}$

有纵模中有两条(或一条)谱线比较强,可看到参考条纹强度的周期性变化,证实 $1/3$ 与 $2/3, 1/4$ 与 $3/4$ 有相同的条纹间隔。当条纹间隔对应的波长数越小时,灵敏度越高,调节的要求也提高。如把干涉仪看作光谱仪, d 越小,自由光谱区越大。当 $d/L < 1/10$ 时,可以看到 Doppler 形线内所有谱线。如图 5 所示。

(2) 干涉镜 M_1 用 $R = 80\%$ 面形差小于 $\lambda/20$ 的平面镜, M_2 用有半个光圈球差的 $50/50$ 分束镜。当改变 d 时, $d/L = 1/2, 1/3, 1/4, \dots$, 干涉图的圈数逐步增加,如图 6 所示,说明这种方法可以高精度地检验反射镜或分束镜的面形差。

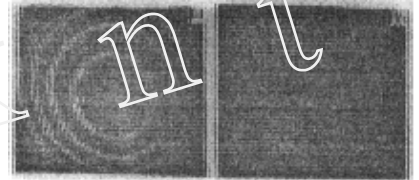


Fig. 6 The interferograms formed by a plane mirror ($\lambda/20$) and $50/50$ beam splitter with aberration
a— $d/L = 1/2$ b— $d/L = 1/6$

(3) M_1, M_2 都用 $R = 80\%$ 介质膜反射镜,测量稳定电压源(约 20V)加热的烙铁在空气中温度场。用 CCD 象机记录,在计算机屏幕上显示。图 7 是 $d/L = 1, 1/2, 1/3, 1/4$ 的干涉图。灵敏度越高,给出的信息量越大。

(4) 图 8 是 SF_6 从单缝喷管喷出,注入流动速度约为 70m/s ,静压为 6Torr 的空气流中。相邻干涉条纹间隔为 $\lambda/4$ (He-Ne 激光)。由此干涉图可以算出 SF_6 的浓度分布。

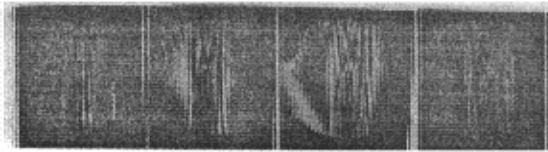


Fig. 7 The interferograms of a constant temperature field formed by a warm iron $d/L = 1/2, 1/4, 1/6, 1/8$ (from left to right)



Fig. 8 Fringe patterns of SF_6 injection into air at $6\text{Torr}, d/L = 1/2$ a—reference fringe pattern b—mixing flow field pattern

四、结 束 语

在文献[2]中已用多波长多光束干涉原理来检验镜子的面形。文中使用三台可调谐 He-Ne 激光器,每台调谐在不同的频率上,使干涉条纹调谐在视场的不同位置,在整个视场中有四条条纹,条纹间隔为 $\lambda/17$ 。我们这里巧妙地运用两个谐振腔,一个是有源的,一个是无源的串联起来的频率特性,使在实验上方便和简单得多。必须指出,多光束干涉图的定量分析和计算,原则上只能适合于小程差或折射率梯度很小的情况。否则,由于光线折射和多次反射破坏被测场与干涉图在空间的一一对应关系;另外有小倾角的多光束 Fizeau 干涉条纹的强度分布偏离 Airy 分布,在主条纹一侧出现子条纹^[3],在有倾角和长的镜间间距的情况下,这个问题应该予以特别的注意。

参 考 文 献

- 1 Langenbeck P H. Appl Opt, 1969;8(3) :543
- 2 Pilston R, Steinberg G. Appl Opt, 1969;8(3) :553
- 3 M. 玻恩, E. 沃耳夫. 光学原理,上册. 北京:科学出版社,1979 :462

作者简介:吴宝根,男,1939年6月出生。副研究员。主要从事气体光学和大功率激光器光束质量的研究和测量。

收稿日期:1996-07-13

