

# 光栅多普勒纳米干涉仪\*

林德教 蒋 弘 殷纯永

(清华大学精密仪器与机械学系 北京 100084)

**提要** 用横向塞曼激光作光源构成的 Dammann 光栅多普勒干涉仪有利于降低热膨胀影响, 测量过程中干涉臂长不变、便于克服折射率漂移, 具有 0.7 nm 分辨率。分析了光栅退偏效应的影响, 与差动双频激光干涉仪进行了比对。实验结果表明, 光栅间距光学 8 细分等间隔, 当光栅栅距为 20  $\mu\text{m}$  时其测量非线性误差不超过 25 nm。

**关键词** Dammann 光栅, 纳米分辨率, 退偏效应, 非线性误差

21 世纪对纳米测量有广泛的需求。例如在微电子领域, 1999 年典型线宽 180 nm, 2006 年典型线宽 100 nm, 2009 年典型线宽 70 nm。定位精度应为线宽的 1/3~ 1/4。在生物领域 DNA 的尺度在 2~ 3 nm。

纳米测量是对计量学的挑战, 要求应用层面上的激光稳频达到  $10^{-9}$ , 在半个波长内的细分均匀性(非线性误差)计入误差, 对环境控制的要求又不能过于苛刻。研究表明, 横向塞曼激光是一种理想的光源, 差动双频外差干涉仪的非线性误差只有 2 nm<sup>[1]</sup>。但是, 干涉仪测长必然有光程差的变化, 而光程差的变化必然导致难以消除的折射率漂移和热漂移。当前光栅干涉仪受到广泛注意, 采用栅距 1  $\mu\text{m}$  的正弦光栅、通过线性内插细分使分辨率达 10 nm, 非线性误差为 50 nm 的系统已见报道<sup>[2]</sup>。

本文研究的光栅多普勒纳米干涉仪采用横向塞曼激光作光源, 实现光学 8 细分, 采用相位测量具有纳米分辨率, 它可以选择与工件膨胀系数相近的玻璃材料制作光栅, 特别是光栅运动过程中不引起干涉仪臂长的变化。这些优点恰好符合纳米测量和定位在稳定性方面的需要。文中分析了光栅退偏效应的影响、光学 8 细分的等分性和 1/8 间距内的非线性误差, 给出了实验标定的结果。

## 1 Dammann 光栅干涉仪系统原理

如图 1, 将 Dammann 光栅<sup>[3]</sup> 8(50 线/mm, 栅距  $d = 20 \mu\text{m}$ ), 平面反射镜 11 分别置于凸透镜 9(焦距为 100 mm) 的两个共轭焦平面上。处于横向磁场下的 He-Ne 激光器 1 由于横向塞曼效应输出一对具有一定频差(约为 330 kHz)的正交线偏振光, 经过 Dammann 光栅衍射分束, 保留  $\pm 1$  级主极大衍射光, 通过凸透镜会聚成平行光束, 投射到平面镜上并由之反射返回, 再

\* 国家自然科学基金(No. 59875051)、国家教委博士点基金联合资助项目。

收稿日期: 1999-08-12; 收到修改稿日期: 1999-09-17

经过凸透镜由 Dammann 光栅合光。

在+ 1 级衍射光路中放置快轴与偏振方向成 45°的  $\lambda/4$  波片 10 实现偏振态互换, 与- 1 级衍射光形成外差信号。混合光束经偏振棱镜 PBS4 偏振分光, 分别被光电接收器 5 和 6 接收后形成参考信号和测量信号, 通过对二者比相实现纳米测量。因为出射光偏离透镜主轴  $H/2$ , 与返回的光路在高度方向相距  $H$  (约 10 mm), 所以不会产生回授。

干涉仪中 Dammann 光栅的横向平动引起多普勒频移, 由此形成光学 8 倍频的光栅干涉仪系统。将干涉仪的光路部分以平面镜为对称轴作镜面展开, 可得  $s, p$  偏振各分量的频率变化情况如图 2 所示, 最后由 PBS 偏振分光可得差频

$$\Delta f = [f_1 + 2f_D - (f_2 - 2f_D)] - [f_1 - 2f_D - (f_2 + 2f_D)] = 8f_D \quad (1)$$

其中,  $f_1, f_2$  为正交偏振光频率;  $f_D$  为光栅多普勒频移, 由光栅方程  $d \sin \beta = m \lambda, m = 1$  可得  $\sin \beta = \frac{\lambda}{d}, f_D = \frac{v}{\lambda} \sin \beta = \frac{v}{\lambda} \cdot \frac{\lambda}{d} = \frac{v}{d}$ ,  $d$  为光栅栅距。

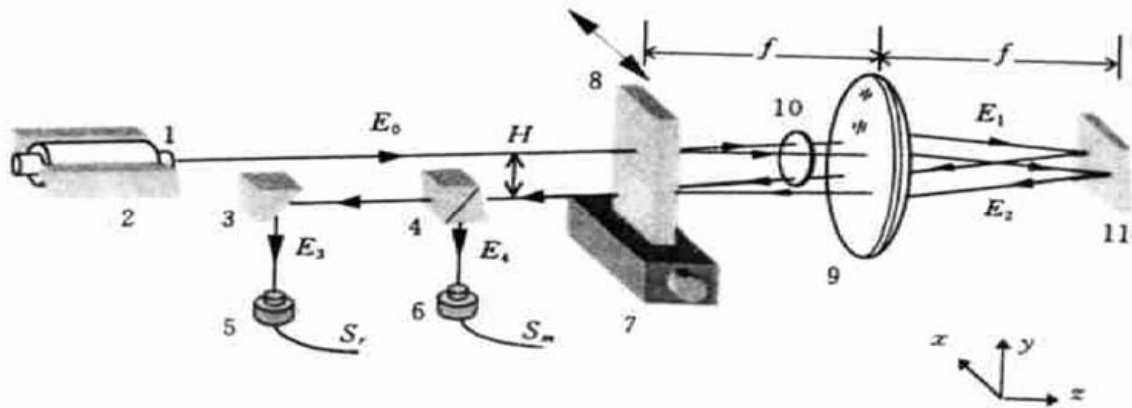


图 1 光栅干涉仪示意图

- 1: He-Ne 激光管; 2: 永久磁钢; 3: 反射棱镜; 4: 偏振棱镜; 5, 6: 光电接收器;
- 7: 微动工作台; 8: Dammann 光栅; 9: 凸透镜; 10: 1/4 波片; 11: 平面反射镜

Fig. 1 Schematic setup of the grating interferometer

- 1: He-Ne laser tube; 2: permanence magnet; 3: reflective prism; 4: polarizing prism; 5, 6: photoelectric detector;
- 7: moving table; 8: Dammann grating; 9: convex lens; 10: quarter wave plate; 11: plane mirror

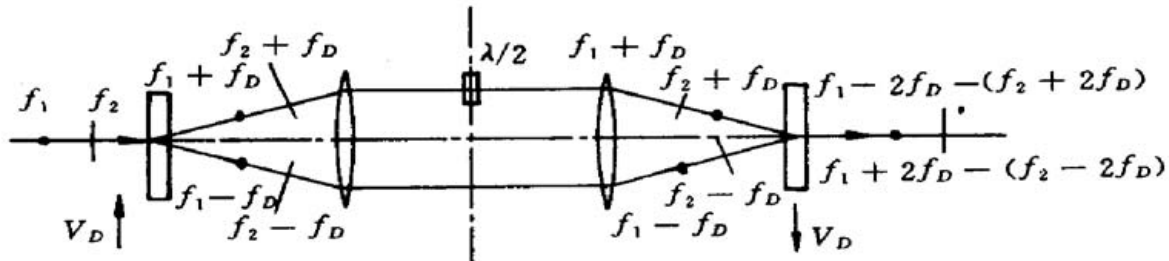


图 2 系统光路展开图(俯视图)

Fig. 2 Unfolded view of the optical path (planform)

比相后可得相位差  $\Delta\phi$  为

$$\Delta\phi = \int_0^s 2\pi\Delta f \cdot dt = \int_0^s 8f_D \cdot dt \times 360^\circ = 2880 \int_0^s \frac{v}{d} \cdot dt = 2880 \frac{s}{d} \quad (2)$$

式中,  $s$  为被测位移量;  $\Delta\phi$  的单位为度。由此可知, 本干涉仪系统对光栅多普勒频移产生了 8 倍

的放大作用,有效地提高了测量分辨率和精度。

由式(2)可求得光栅位移量  $s$  为

$$s = \frac{d}{2880} \times \Delta\phi \quad (3)$$

在本系统中  $d = 20 \mu\text{m}$ , 相位计  $0.1^\circ$  的位相测量分辨率对应着干涉仪  $0.7 \text{ nm}$  的位移测量分辨率。要进一步提高分辨率,可以采用栅距更小的位相光栅。

## 2 纳米比对实验

为了确定光栅干涉仪的测量精度,将它与本实验室研制的差动双频激光干涉仪 DDFI (Differential Dual-Frequency Interferometer) 进行比对。DDFI 已与国家计量研究院的 F-P 干涉仪标定过,其非线性误差仅  $2 \text{ nm}$ 。

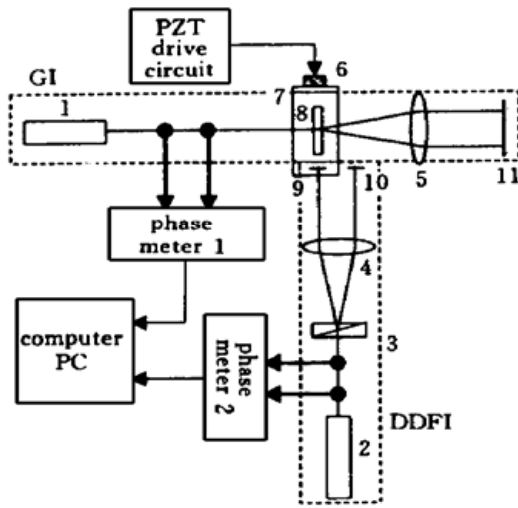


图3 纳米比对实验装置示意图

1, 2: 横向塞曼激光器; 3: Wallaston 棱镜; 4, 5: 凸透镜; 6: 压电陶瓷; 7: 微动工作台; 8: Sammann 光栅; 9: 测量平面镜; 10: 参考平面镜; 11: 平面反射镜

Fig. 3 Experimental setup for nanometer calibration between grating interferometer and DDFI

1, 2: transverse Zeeman laser; 3: Wallaston prism; 4, 5: convex lens; 6: PZT; 7: moving table; 8: Dammann grating; 9: measurement plane mirror; 10: reference plane mirror; 11: plane reflective

在实验一的基础上,进一步研究了光栅栅距 8 细分是否为等间隔,为此在 2 个栅距的长度范围内进行了测量比对,结果如图 4(b) 所示。为了排除在此测量过程中单周期非线性误差的影响,每个测量点均取在相位差为  $180^\circ$  附近。

由图 4(b) 可知,在较大量程范围内测量时,光栅干涉仪和差动双频激光干涉仪之间有着很好的线性关系,这证明用目前的标定方法尚未发现不等分问题。所以干涉仪的测量精度取决于单周期的非线性误差,在不经修正的情况下达到  $25 \text{ nm}$ 。

采用纳米比对方法确定该光栅干涉仪非线性误差的实验装置如图 3 所示。整个装置主要由三部分构成:光栅干涉仪(GI),纳米精度差动双频激光干涉仪和测量微动工作台。

系统中,GI 的 Dammann 光栅 8 和 DDFI 的测量平面镜 9 安装在同一微动工作台上,经过微调使其位于同一测量直线上;将 DDFI 的参考平面镜 10 调整好位置后固定不动。测量时,高压电源驱动压电陶瓷使之产生电致收缩或伸长,通过柔性铰链杠杆机构驱动微动工作台 7 产生  $x$  向位移,从而带动固定在微动工作台 7 上 GI 的 Dammann 光栅和 DDFI 的测量平面镜运动。通过比较二者的测量结果可实现纳米比对。

为减少人为因素影响,二者的比对结果由 PC 机同步采集。

实验之一是确定 GI 在一个测量周期 ( $d/8$ ) 内的测量非线性误差,由实验曲线图 4(a) 可知,在一个测量周期内,总的误差约为  $\pm 28 \text{ nm}$ ,其中由 GI 造成的测量误差约占  $\pm 25 \text{ nm}$ 。其误差有可能来自光栅和偏振器件。从图中的残差曲线可以看出,误差呈现明显的非线性<sup>[4]</sup>,接近正弦曲线。

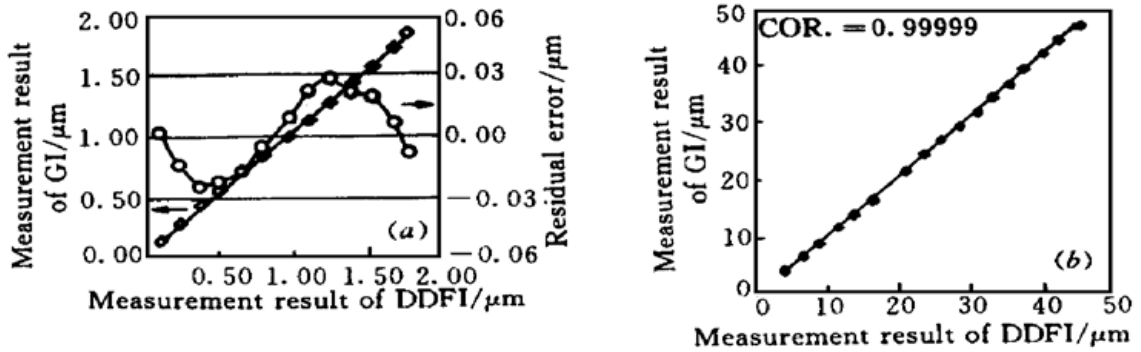


图 4 比对实验结果曲线图

Fig. 4 Curves of calibration experiment results

### 3 光栅退偏效应影响的分析

对于非线性误差的成因,光栅的退偏自然也是一个可疑的因素。光栅退偏问题的分析要借助于严格的矢量衍射理论。但对于本文中的光栅而言,其周期超过 30 倍波长,所以计算的收敛性及收敛速度方面可能要遇到问题。据文献[5]报道,用  $R$  矩阵传播算法可克服数值计算的不稳定性,但有相当的计算工作量。理论计算<sup>[6]</sup>和实验事实<sup>[7]</sup>都支持下述说法,即波长一定时,光栅的退偏随着光栅周期的增大而减小。所以,不妨先分析周期为一倍波长的光栅,这时可以应用等效媒质理论。

根据 Rytov<sup>[4]</sup>的等效媒质理论,等效的寻常光折射率  $n_o$  和非寻常光折射率  $n_e$  可由下述超越方程求出

$$\begin{aligned} \sqrt{n_1^2 - n_o^2} \tan \left[ \frac{d}{\lambda} \pi (1 - F) \sqrt{n_1^2 - n_o^2} \right] &= - \sqrt{n_3^2 - n_o^2} \tan \left[ \frac{d}{\lambda} \pi F \sqrt{n_3^2 - n_o^2} \right] \\ \frac{\sqrt{n_1^2 - n_e^2}}{n_1^2} \tan \left[ \frac{d}{\lambda} \pi (1 - F) \sqrt{n_1^2 - n_e^2} \right] &= - \frac{\sqrt{n_3^2 - n_e^2}}{n_3^2} \tan \left[ \frac{d}{\lambda} \pi F \sqrt{n_3^2 - n_e^2} \right] \end{aligned} \quad (4)$$

式中,  $n_1$  和  $n_3$  分别为空气和玻璃的折射率,  $F$  为光栅的占空比。本文中,  $n_1 = 1$ ,  $n_3 = 1.5$ ,  $F = 0.5$ ,  $d = \lambda$ , 因此计算可得:  $n_o = 1.37255$ ,  $n_e = 1.30845$ 。则由此引入的相位差  $\Gamma$  为

$$\Gamma = \frac{2\pi h}{\lambda} (n_o - n_e) = 0.403 \text{ rad} \quad (5)$$

式中  $h$  为光栅的台阶高度, 本文  $h = \lambda$ 。在计算退偏时可以把光栅考虑为一片波片, 退偏的结果是将入射的线偏振光椭圆偏化、产生偏振混叠, 引起的误差矢量大小为

$$\frac{\alpha'}{E_{01}} = \frac{\beta'}{E_{02}} = \sin \frac{\Gamma}{2} \sin 2\Psi \quad (6)$$

式中  $\Psi$  为入射光矢量的偏振方向与光栅矢量的夹角,  $E_{01}$ ,  $E_{02}$  为正交偏振矢量,  $\alpha'$ ,  $\beta'$  为退偏产生的误差矢量。

偏振混叠使信号产生幅度调制, 是导致非线性误差的根源。由式(6) 可得, 调制深度和退偏的关系为

$$k = 2 \sin(\Gamma/2) \sin 2\Psi \quad (7)$$

由于实际使用中, 光栅的栅线是平行或垂直于入射光矢量的偏振方向的, 即  $\Psi = 0$  或  $\Psi = 90^\circ$ , 所以  $k = 0$ , 原则上不会发生退偏。当  $\Psi$  的安装偏差为  $1^\circ$  时, 由(7) 式易算得此时  $k =$

0.014。这里必须指出,上面的计算是在  $d = \lambda$  的假设下进行的,实际使用的光栅参数为  $d \approx 32\lambda$ , 所以其退偏程度以及由此引起的幅度调制必定远小于上面的计算值。

## 4 结 论

本文介绍了一种基于横向塞曼激光器、采取 Dammann 光栅作为分光 and 测量元件的干涉仪,光栅多普勒频移通过光路产生 8 倍频,其测量分辨率可以达到纳米量级。与差动外差双频激光干涉仪的比对结果证明了 8 倍频等间隔细分,1/8 栅距内的非线性误差为 25 nm。理论分析表明在安装偏差不大的情况下光栅的退偏效应对测量结果影响很小。非线性误差主要来自波片和其他偏振器件。

## 参 考 文 献

- 1 Chunyong Yin, Gaoliang Dai, Zhixia Chao *et al.*. Determining the residual nonlinearity of a high-precision heterodyne interferometer. *Opt. Eng.*, 1999, **38**(8): 1361~ 1365
- 2 Marek Dobosz. High-resolution laser linear encoder with numerical error compensation. *Opt. Eng.*, 1999, **38**(6): 968~ 973
- 3 Jin Guofang, Yan Yingbai, Wu Minxian. Binary Optics. Beijing: Press of National Defense Industry, 1998. 56~ 59 (in Chinese)
- 4 Norman Bobroff. Recent advances in displacement measuring interferometry. *Measurement Science Technology*, 1993, **4**: 907~ 926
- 5 Lifeng Li. Multilayer model method for diffraction gratings of arbitrary profile, depth, and permittivity. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1993, **10**(12): 2581~ 2591
- 6 E. N. Glytsis, T. K. Gaylord, L. David. Brundrett. Rigorous coupled-wave analysis and applications of grating diffraction. Sing H. Lee, *Diffraction and Miniaturized Optics*. Bellingham: SPIE, 1993, **CR94**: 3~ 31
- 7 Mao Wenwei, Jiang Hong, Yin Chunyong. Depolarization of binary optical splitter in four channel two frequency interferometer. *Opt. Technol.* (光学技术), 1998, (4): 22~ 24 (in Chinese)

## Nanometer Interferometer Using Grating Doppler Effect

Lin Dejiao Jiang Hong Yin Chunyong

(Department of Precision Instruments and Mechanology, Tsinghua University, Beijing 100084)

**Abstract** A Dammann grating interferometer using transverse Zeeman laser as light resource is developed in this paper. It takes advantages of reducing the effect of thermal expansion. Drift of the air refraction index can be easily conquered due to equivalent beam length. It is an attractive configuration with resolution of 0.7 nm. The error caused by the depolarization effect of the grating is analyzed. Calibration experiment between this grating interferometer and a differential dual-frequency interferometer has been implemented. The experimental results show that the equal divisions of the grating pitch by 8 times via optical system and the nonlinearity error is no more than 25 nm when the grating pitch equals 20  $\mu\text{m}$ .

**Key words** Dammann grating, nanometer resolution, depolarization effect, nonlinearity error