

文章编号: 0258-7025(2008)02-0240-05

激光合成波长纳米测量干涉仪的非线性误差分析

陈本永¹ 穆瑞珍¹ 周砚江¹ 李达成²

(¹ 浙江理工大学纳米测量技术实验室, 浙江 杭州 310018; ² 清华大学精密测试技术及仪器国家重点实验室, 北京 100084)

摘要 描述了激光合成波长纳米测量干涉仪的测量原理, 分析了非线性误差对该干涉仪的影响, 得出了由偏振光非正交、椭圆化和光学元件偏振非正交及椭圆化等对该干涉仪造成的非线性误差为偏振态误差的二阶或高阶小量。进行了激光合成波长纳米测量干涉仪和激光外差干涉仪的对比实验, 结果表明激光合成波长纳米测量干涉仪的最大误差为 2.1 nm, 优于激光外差干涉仪的最大误差 7.5 nm, 验证了激光合成波长纳米测量干涉仪的优越性。

关键词 测量; 干涉仪; 合成波长; 非线性误差; 偏振光非正交

中图分类号 TH 744.3 **文献标识码** A

Nonlinear Error Analysis of Laser Synthetic-Wavelength Nanomeasurement Interferometer

Chen Benyong¹ Mu Ruizhen¹ Zhou Yanjiang¹ Li Dacheng²

(¹ *Laboratory of Nanometer Measurement, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou, Zhejiang 310018, China*
² *State Key Laboratory of Precision Measurement Technology and Instruments, Tsinghua University, Beijing 100084, China*)

Abstract The principle of laser synthetic-wavelength nanomeasurement interferometer is described. The nonlinear errors which affect on this interferometer are analyzed. Theoretical analysis results show that nonlinear errors caused by nonorthogonal polarization, elliptic polarization of laser source, nonideal polarization beam splitter and corner prism are second or higher order polarization error, the comparable experiment of laser synthetic-wavelength nanomeasurement interferometer and a heterodyne interferometer was performed. The maximal error of laser synthetic-wavelength nanomeasurement interferometer is 2.1 nm, while the maximal error of heterodyne interferometer is 7.5 nm.

Key words measurement; interferometer; synthetic-wavelength; nonlinearity error; nonorthogonal polarization

1 引 言

在偏振光纳米干涉测量系统中, 非线性误差主要来源于激光源的偏振态非正交及椭圆化, 光学元件, 特别是偏振元件性能不理想或调整不完善^[1,2]。其现象是两个正交方向上的偏振光不能彻底分开, 从而形成较大的周期性非线性误差^[3], 成为影响测量精度的重要误差源。国内外许多文献都对此进行了较为详尽的分析, 包括单频偏振干涉仪^[4,5]和双频外差干涉仪^[6~11], 也提出了不少修正方法, 如增加测量系统光学器件或相位检测电路。但这往往使得测量系统结构复杂, 还增加了光学器件及电路的随机漂移误差。而本文所提出的激光合成波长纳米测量干涉仪受这些因素的影响较小, 详细分析了该

干涉仪的光路特点及其非线性误差。

2 原 理

激光合成波长纳米测量干涉仪的基本原理如图 1 所示, 采用频差为 1 GHz 的双纵模激光器作为光源, 激光器输出两正交线偏振光, 其中波长为 λ_1 的光束经分束器(BS)分成两路, 分别射向偏振分束器 1(PBS1)和参考镜 M_1 后返回, 经偏振分束器 2(PBS2)全反射, 用探测器 1 检测其干涉条纹信号; 波长为 λ_2 的光束经分束器分成两路, 一路光束透过 PBS1 射向测量镜 M_2 后返回, 另一路射向参考镜 M_1 后返回, λ_2 的干涉信号透过 PBS2 后用探测器 2 检测其干涉条纹信号。

收稿日期: 2007-07-20; 收到修改稿日期: 2007-09-10

基金项目: 国家自然科学基金(50275138, 60575055)资助项目。

作者简介: 陈本永(1965—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为纳米测量技术。E-mail: chenby@zstu.edu.cn

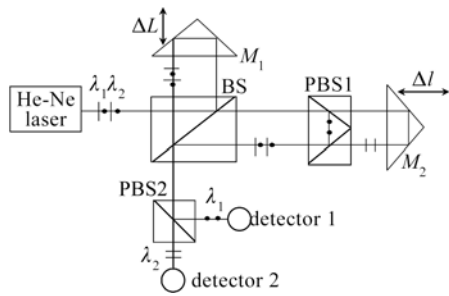


图 1 激光合成波长纳米测量干涉仪的原理图

Fig. 1 Schematic diagram of the laser synthetic-wavelength nanomeasurement interferometer

图 1 中,当参考镜 M_1 和测量镜 M_2 同时运动时,参考镜的运动位移 ΔL 和测量镜的位移 Δl 存在一一对应的关系,当测量镜运动一个单波长 λ_2 的位移时,参考镜恰好运动一个合成波长 λ_s 的位移。理论分析得被测位移

$$\Delta l = \frac{\lambda_2}{\lambda_s} \Delta L, \quad (1)$$

由(1)式可得到干涉条纹的细分系数为

$$K_{\text{div}} = \lambda_2 / \lambda_s. \quad (2)$$

如果光源采用 $0.6328 \mu\text{m}$ 波段 He-Ne 双纵模激光器,单波长 $\lambda_2 = 0.6328 \mu\text{m}$,其输出的两个光频率差约为 $\Delta\nu = 1070 \text{ MHz}$,则合成波长为 $\lambda_s \approx 280 \text{ nm}$,可以得到干涉条纹细分系数 $K_{\text{div}} = \lambda_2 / \lambda_s \approx 1/440000$,这表明通过对参考镜毫米级位移的测量,即可实现对测量镜纳米级位移的高精度测量,这样大的细分系数要优于目前所有的干涉条纹细分方法。

3 非线性误差分析

在激光偏振干涉光路中,由于激光源偏振态不理想或不稳定,实际光路光学元件性能及调整的不理想,都可能引起非线性误差。基于合成波长干涉条纹细分原理的纳米测量干涉仪,光路结构简单,涉及光学元件较少,由光源、偏振分束器和角锥棱镜引入的非线性误差要小于一般的光学纳米干涉系统。

3.1 双纵模激光偏振态的影响

3.1.1 激光源引入的偏振混叠影响

双纵模 He-Ne 激光器可发射振动方向正交、频差为数百兆赫兹的线偏振光;其振动方向往往有 $20^\circ \sim 30^\circ$ 以下的漂移,实施稳频后可明显减小漂移范围,但不能完全消除,其方向也有再现偏差。设光源输出的两个波长在偏振方向上存在如图 2 所示的误差,其矢量形式为

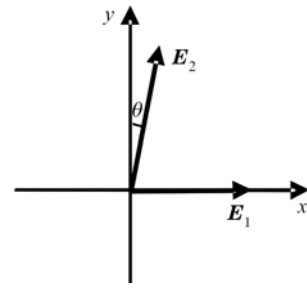


图 2 偏振非正交

Fig. 2 Nonorthogonality of the polarization directions

$$\mathbf{E}_1 = i\mathbf{E}_1 \cos(\omega_1 t + \varphi_1),$$

$$\mathbf{E}_2 = i\mathbf{E}_2 \sin\theta \cos(\omega_2 t + \varphi_2) +$$

$$j\mathbf{E}_2 \cos\theta \cos(\omega_2 t + \varphi_2), \quad (3)$$

式中 i, j 分别为 x, y 轴方向的单位矢量, ω_1, ω_2 分别为两个波长的角频, φ_1, φ_2 分别为两个波长的相位, $\mathbf{E}_1, \mathbf{E}_2$ 分别为两个波长的电矢量强度,为简化推导,将 $\mathbf{E}_1, \mathbf{E}_2$ 设为 1。在经过如图 1 所示的系统后,在 x 方向存在的信号分量为:波长 λ_1 经过 M_1 的反射光 E_{11} ;波长 λ_1 经过 PBS1 的透射光 E_{12} ;波长 λ_2 经过 M_1 的反射光 E_{21} ;波长 λ_2 经过 PBS1 的透射光 E_{22} 。设经过 M_1 的衰减系数为 1,则可以得到探测器 1 上的干涉信号为

$$\begin{aligned} \mathbf{E}_{D1} = & i(\mathbf{E}_{11} + \mathbf{E}_{12} + \mathbf{E}_{21} + \mathbf{E}_{22}) = \\ & i[\cos(\omega_1 t + \varphi_1 + \varphi_{11}) + \\ & K_1 \cos(\omega_1 t + \varphi_1 + \varphi_{12}) + \\ & \sin\theta \cos(\omega_2 t + \varphi_2 + \varphi_{21}) + \\ & K_2 \sin\theta \cos(\omega_2 t + \varphi_2 + \varphi_{22})], \quad (4) \end{aligned}$$

式中 K_1, K_2 分别为参考干涉仪中测量臂对波长 λ_1, λ_2 引入的衰减系数; φ_{11} 和 $\varphi_{21}, \varphi_{12}$ 和 φ_{22} 分别为参考干涉仪中参考臂和测量臂光程对两个波长 λ_1, λ_2 引入的相位延迟。在忽略直流项以及高频的情况下,由式(4)可以得到探测器 1 上的光强为

$$\begin{aligned} I_{D1} = & \mathbf{E}_{D1} \mathbf{E}_{D1}^* = K_1 \cos(\varphi_{11} - \varphi_{12}) + \\ & K_2 \sin^2 \theta \cos(\varphi_{21} - \varphi_{22}), \quad (5) \end{aligned}$$

式中 $*$ 为复共轭符号。式(5)前一项为有效信号,后一项则为偏振混叠带来的误差项。同理分析在 y 方向上存在的信号分量,可得探测器 2 上的干涉信号光强为

$$I_{D2} = \mathbf{E}_{D2} \mathbf{E}_{D2}^* = K_2' \cos^2 \theta \cos(\varphi_{21}' - \varphi_{22}'), \quad (6)$$

式中 K_2' 为在测量干涉仪中测量臂引入的衰减系数,设参考臂中的衰减系数为 1; $\varphi_{21}', \varphi_{22}'$ 分别为测量干涉仪中参考臂和测量臂光程对两个波长 λ_1, λ_2 引入的相位延迟。式(6)所表达的光强信号与理想状态下相比只是幅值有些下降,信号相位不变。将式

(5) 化为标准光强表达式

$$I_{D1} = A \cos[(\varphi_{11} - \varphi_{12}) + \eta], \quad (7)$$

式中

$$A = \{K_1^2 + K_2^2 \sin^4 \theta + 2K_1 K_2 \sin^2 \theta \cos[(\varphi_{21} - \varphi_{22}) - (\varphi_{11} - \varphi_{12})]\}^{1/2},$$

$$\eta \approx \frac{K_2}{K_1} \sin[(\varphi_{11} - \varphi_{12}) + (\varphi_{21} - \varphi_{22})] \theta^2, \quad (8)$$

由式(8)可看出,激光器输出的线偏振光引起的非正交误差表现为 $(\varphi_{11} - \varphi_{12}) + (\varphi_{21} - \varphi_{22})$,为自变量的周期性相位扰动,其大小是 θ 的二阶小量。

3.1.2 偏振正交椭圆化

激光器输出的两个波长可能出现正交椭圆化,即激光器谐振腔输出的光束不是真正的圆偏振态,而是椭圆偏振态,经 $\lambda/4$ 波片后,其出射光束不是偏振方向相互垂直的线偏振光,而是椭圆偏振光。偏振正交椭圆化描述如图3所示,其矢量形式为

$$\begin{aligned} \mathbf{E}_1 &= i \cos \theta \cos(\omega_1 t + \varphi_1) + j \sin \theta \cos(\omega_1 t + \varphi_1), \\ \mathbf{E}_2 &= i \sin \theta \cos(\omega_2 t + \varphi_2) + j \cos \theta \cos(\omega_2 t + \varphi_2), \end{aligned} \quad (9)$$

则可得探测器1上的干涉信号

$$\begin{aligned} \mathbf{E}_{D1} &= i(E_{11} + E_{12} + E_{21} + E_{22}) = \\ & i[\cos \theta \cos(\omega_1 t + \varphi_1 + \varphi_{11}) + \\ & K_1 \cos \theta \cos(\omega_1 t + \varphi_1 + \varphi_{12}) + \\ & \sin \theta \cos(\omega_2 t + \varphi_2 + \varphi_{21}) + \\ & K_2 \sin \theta \cos(\omega_2 t + \varphi_2 + \varphi_{22})], \\ I_{D1} &= E_{D1} E_{D1}^* = K_1 \cos^2 \theta \cos(\varphi_{11} - \varphi_{12}) + \\ & K_2 \sin^2 \theta \cos(\varphi_{21} - \varphi_{22}) = \\ & A_1 \cos[(\varphi_{11} - \varphi_{12}) + \eta], \\ \mathbf{E}_{D2} &= j(E'_{11} + E'_{12} + E'_{21} + E'_{22}) = \\ & j[\sin \theta \cos(\omega_1 t + \varphi_1 + \varphi'_{11}) + \\ & K'_1 \sin \theta \cos(\omega_1 t + \varphi_1 + \varphi'_{12}) + \\ & \cos \theta \cos(\omega_2 t + \varphi_2 + \varphi'_{21}) + \\ & K'_2 \cos \theta \cos(\omega_2 t + \varphi_2 + \varphi'_{22})], \\ I_{D2} &= E_{D2} E_{D2}^* = K'_1 \sin^2 \theta \cos(\varphi'_{11} - \varphi'_{12}) + \\ & K'_2 \cos^2 \theta \cos(\varphi'_{21} - \varphi'_{22}) = \\ & A_2 \cos[(\varphi'_{21} - \varphi'_{22}) + \eta], \end{aligned}$$

可以得到

$$\begin{aligned} \eta &\approx \frac{K_2}{K_1 \cos^2 \theta} \sin[(\varphi_{11} - \varphi_{12}) + (\varphi_{21} - \varphi_{22})] \theta^2, \\ \eta &\approx \frac{K'_2}{K'_1 \cos^2 \theta} \sin[(\varphi'_{11} - \varphi'_{12}) + (\varphi'_{21} - \varphi'_{22})] \theta^2, \end{aligned} \quad (10)$$

由式(10)可以看出光源偏振正交椭圆化引入的误差也是 θ 的二阶小量,对测量结果影响极小。

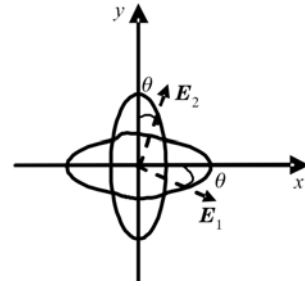


图3 偏振正交椭圆化

Fig. 3 Elliptical polarization in two orthogonality direction

3.2 偏振分束器引入的误差

偏振分束器存在的误差主要是由偏振分束方向非正交和偏振泄漏引起的。两列正交光波 $\mathbf{E}_1, \mathbf{E}_2$ 通过偏振分束器后,输出光的方向发生变化,偏振非正交,其本质是一个偏振方向的光矢量中混叠了另一个偏振方向光矢量的一阶小量。由图1可以看出光线要两次经过偏振分束器,因此混叠也要发生两次,且同时在两个方向发生。设输入光的方向坐标为 xy ,输出方向为 xy' 。由图4可以看出,输出光的矢量为

$$\begin{aligned} \mathbf{E}_x &= i(\mathbf{E}_1 - 2\mathbf{E}_2 \tan \theta), \\ \mathbf{E}_{y'} &= j(\mathbf{E}_2 - 2\mathbf{E}_1 \tan \theta), \end{aligned} \quad (11)$$

将式(11)与(9)对比,可以看出它们都是一个方向上的分量出现在另一个方向中,因此推导类似,得到的偏振分束器非正交引入的相位误差仍是 θ 的二阶小量。

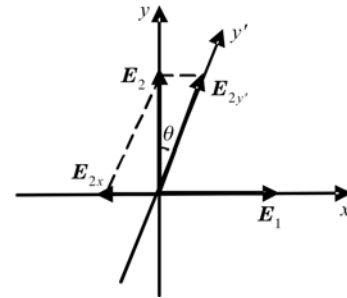


图4 偏振分光方向不正交

Fig. 4 Nonorthogonality directions of polarization beam splitter

若偏振分束器存在泄漏,设其泄漏因子为 K ,可以得到经过偏振分束器的两个偏振矢量分别为

$$\begin{aligned} \mathbf{E}_1 &= i(1 - K) \cos(\omega_1 t + \varphi_1) + jK \cos(\omega_2 t + \varphi_2), \\ \mathbf{E}_2 &= iK \cos(\omega_1 t + \varphi_1) + j(1 - K) \cos(\omega_2 t + \varphi_2). \end{aligned} \quad (12)$$

在系统中光波两次经过偏振分束器,因此可以得到探测器1上的信号分量为

$$\begin{aligned} \mathbf{E}_{D1} &= iK_1(1 - K)^2 \cos(\omega_1 t + \varphi_1 + \varphi_{12}) + \\ & jK_2 K^2 \cos(\omega_2 t + \varphi_2 + \varphi_{22}), \end{aligned} \quad (13)$$

探测器 2 上的信号分量为

$$\begin{aligned} E_{D2} = & jK'_2(1-K)^2 \cos(\omega_2 t + \varphi_2 + \varphi'_{22}) + \\ & iK'_1 K^2 \cos(\omega_1 t + \varphi_1 + \varphi'_{12}), \end{aligned} \quad (14)$$

由式(13),(14)可以看出泄漏成分的幅值仅为原入射光幅值的 K^2 倍,为二阶小量,可以推导出其引入的误差也为高阶小量。

3.3 角锥棱镜的影响

线偏振光在角锥棱镜内有三次全反射,只有在光的偏振方向严格垂直于反射面或平行于反射面的情况下,线偏振光才不会变成椭圆偏振光。考虑当线偏振光正交椭圆化时,偏振态的表达形式与激光器偏振正交椭圆化相似(式(9)),因此可以得到同样的结论:角锥棱镜椭圆化引入的也是二阶非线性误差。

由分析可以看出,在激光合成波长纳米测量干涉仪中,由于光源、光学元件偏振光非正交、椭圆化等引起的非线性误差其大小都为二阶或高阶误差,相比于外差干涉仪的一阶误差,其对测量过程影响较小。

4 实验

用激光合成波长纳米测量干涉仪与外差干涉仪分别对同一高精微位移运动工作台进行比对测量。合成波长干涉仪实验原理及装置如图 1 所示,激光器采用 1 GHz 频差双纵模 He-Ne 激光器,测量镜 M_2 所在的微运动平台采用德国 Physik Instrumente 公司生产的具有高精度位移示值的 P-752.11C 型压电陶瓷 (PZT) 驱动微位移运动工作台,运动范围 $15 \mu\text{m}$,分辨率 0.1 nm ;参考镜 M_1 所在的运动平台采用 M-531 型运动平台,其运动范围 306 mm ,分辨率 $0.2 \mu\text{m}$ 。驱动微运动平台使测量镜 M_2 产生微位移,再驱动参考镜 M_1 所在的平台,用相位补偿方法控制 M_1 运动,记录同相位时 M_1 的位置,从而算出 M_2 的位移。外差干涉的实验装置示意图如图 5 所示,参考镜 M_1 ,测量镜 M_2 及其所在平台与图 1 的相同,双频激光器、探测器和数字相位计采用清华普锐科创公司配套研制的频差约为 2 MHz 的横向塞曼效应双频氦氖激光器、高速接收器和高精度数字相位计。在恒温 ($20 \pm 0.3 \text{ }^\circ\text{C}$) 恒湿 (65 ± 3)% 环境下,两套干涉仪装置放置在美国 NewPort RS 4000 气浮隔振光学平台上进行实验测试。在 1300 nm 范围内,测量镜 M_2 以 20 nm 为一运动步长,分别用合成波长干涉仪和外差干涉仪测量这一运动步长。实验结果如图 6 所示,合成波长干涉仪的最

大误差为 2.1 nm ,测量不确定度约为 1.8 nm ;外差干涉仪的最大误差为 7.5 nm ,测量不确定度约为 4.2 nm 。因此在同等实验条件下,激光合成波长纳米测量干涉仪的测量误差优于外差干涉仪。

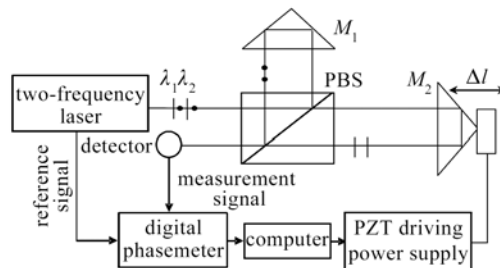


图 5 外差干涉仪测量实验示意图
Fig. 5 Schematic of a heterodyne interferometer experiment

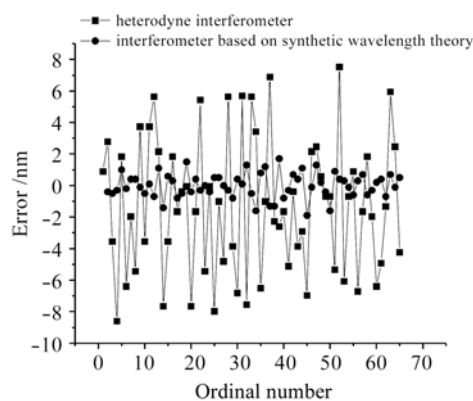


图 6 实验测量结果的比较

Fig. 6 Comparison of experimental measurement results

5 结论

理论分析了偏振光非正交、椭圆化和光学元件偏振非正交及椭圆化引起的非线性误差对偏振干涉仪测量误差的影响,得出了该类非线性误差都为二阶或高阶小量的结果,与外差干涉仪的一阶误差相比,其对测量过程的影响较小。实验测量对比结果表明,激光合成波长纳米测量干涉仪的最大误差为 2.1 nm ,优于激光外差干涉仪的 7.5 nm ,验证了激光合成波长纳米测量干涉仪的优越性。

参 考 文 献

- 1 Wenmei Hou, Günter Wilkening. Investigation and compensation of the nonlinearity of heterodyne interferometers [J]. *Precision Engineering*, 1992, 14(2):91~98
- 2 A. E. Rosenbluth, N. Bobroff. Optical sources of nonlinearity in heterodyne interferometers [J]. *Precision Engineering*, 1990, 12(1):7~11
- 3 Cheng Xiaohui, Li Dacheng, Zhao Yang. Method of nanometer

- measurement using multi-wavelengths interferometry [J]. *Optical Technique*, 2000, **26**(4):313~315
程晓辉,李达成,赵 洋. 一种利用合成波长法实现的纳米测量方法[J]. *光学技术*, 2000, **26**(4):313~315
- 4 Guo Yanzhen, Qiu Zongming, Li Xin. Analysis and calculation on nonlinearity of the laser polarized interferometer [J]. *Acta Metrologica Sinica*, 1995, **16**(4):273~279
郭彦珍,邱宗明,李 信. 激光偏振干涉光路的非线性分析计算[J]. *计量学报*, 1995, **16**(4):273~279
- 5 Chien-ming Wu, Ching-shen Su, Gwo-sheng Peng. Correction of nonlinearity in one-frequency optical interferometry [J]. *Meas. Sci. Technol.*, 1996, **7**(4):520~524
- 6 Dai Gaoliang, Chao Zhixia, Yin Chunyong *et al.*. Determining the residual nonlinear error of a dual-frequency interferometer for nanometrology [J]. *Chinese J. Lasers*, 1999, **A26**(11):987~992
戴高良,晁志霞,殷纯永 等. 纳米精度双频激光干涉仪非线性误差的确定方法[J]. *中国激光*, 1999, **A26**(11):987~992
- 7 Ning Zhigao, Cheng Zhaogu, Gao Haijun. Error analysis of frequency mixing for heterodyne interferometer [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(6):852~855
宁志高,程兆谷,高海军. 外差干涉仪混频误差分析[J]. *中国激光*, 2005, **32**(6):852~855
- 8 Zhao Huijie. Error analysis of frequency mixing for heterodyne interferometer [J]. *Acta Metrologica Sinica*, 1999, **20**(3):166~171
赵慧洁. 外差干涉仪频率混叠误差分析[J]. *计量学报*, 1999, **20**(3):166~171
- 9 Chien-ming Wu, Ching-shen Su. Nonlinearity in measurements of length by optical interferometry [J]. *Meas. Sci. Technol.*, 1996, **7**(1):62~68
- 10 Chen Hongfang, Ding Xuemei, Zhong Zhi. Effect of nonlinearity by the nonideal splitting performance of polarization beam splitter in laser heterodyne interferometry [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(11):1562~1566
陈洪芳,丁雪梅,钟 志. 偏振分光镜分光性能非理想对激光外差干涉非线性误差的影响[J]. *中国激光*, 2006, **33**(11):1562~1566
- 11 Chen Hongfang, Ding Xuemei, Zhong Zhi *et al.*. Method to reduce first harmonic nonlinearity in laser heterodyne interferometry [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(6):1027~1030
陈洪芳,丁雪梅,钟 志 等. 减小外差干涉一次谐波非线性误差的方法[J]. *光学学报*, 2007, **27**(6):1027~1030