

基于偏振混叠的氦氖激光器纳米测尺系统

邓勇¹, 陈康¹, 李继扬²

(1. 南通大学机械工程学院, 江苏南通 226019; 2. 北京航空航天大学仪器科学与光电工程学院, 北京 100191)

摘要:提出一种基于偏振混叠的氦氖激光器纳米测尺系统,将双折射元件插入 He-Ne 激光器谐振腔内产生频率分裂,使激光器变成了频差可调的双频激光器。运用频率分裂、模竞争、双纵模功率调谐等激光物理效应,使用偏振混叠方法和设定浮动阈值,研制了新型的激光器纳米测尺。以激光波长为尺子,具有可溯源性,在没有任何电细分的条件下达到了纳米量级的分辨率,与激光干涉仪的比对实验表明,该系统的分辨率为 79 nm,量程为 20 mm,线性度为 5.8×10^{-5} ,标准差为 520 nm。

关键词:位移测量;正交偏振;He-Ne 激光器;频率分裂;功率调谐;偏振混叠

中图分类号:TN249 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2017.08.003

He-Ne laser nanometer ruler system based on polarization mixture

DENG Yong¹, CHEN Kang¹, LI Ji-yang²

(1. School of Mechanical Engineering, Nantong University, Nantong 226019, China;

2. School of Instrumentation Science and Opto-electronics Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: A novel kind of dual longitudinal mode He-Ne laser nanometer scale measurement system based on polarization mixture was put forward. With the inserted birefringence element, the frequency splitting effect will occur inside the He-Ne resonant cavity, which makes the laser turn into the dual-frequency laser with adjustable frequency difference. By using frequency splitting effect, mode competition effect and double longitudinal mode power tuning effect of laser physics, a new type of laser nanometer measurement ruler was proposed by using polarization mixing and floating threshold setting. The laser wavelength is applied as a ruler with traceability, leading to the nanometer scale resolution without electrical subdivision. The experimental results demonstrate that this system has the optical resolution of 79 nm, the measuring range of 20 mm, the linearity of 5.8×10^{-5} and standard deviation of 520 nm.

Key words: displacement measurement; orthogonal polarization; He-Ne laser; frequency splitting; power tuning; polarization mixture

1 引言

随着纳米科学与技术的发展,对位移测量系统分辨率和精度的基本要求达到了纳米量级。纳米测尺是一种测量分辨率和测量精度都达到纳米量级的接触式位移测量系统。纳米测尺,又称基于频率分

裂的激光器两偏振光竞争位移传感激光器,由清华大学张书练教授课题组研制的一种新型位移传感器^[1],该位移测量系统使用氦氖激光器自身作为传感器,利用频率分裂、模竞争和功率调谐^[2-7],以半波长为尺子,测量被测物体的位移量,这使得氦氖

基金项目:国家自然科学基金项目(No. 61475082);国家重大仪器专项(No. 2011YQ04013603);北京市科委项目(No. Z151100002415027)资助。

作者简介:邓勇(1965-),男,学士,教授,硕导,主要从事测试技术及仪器等方面的研究。E-mail: dengy@ntu.edu.cn
收稿日期:2016-12-29

光器纳米测尺具有可溯源到光波长和每半波长自校准的特性,而且没有原理上的非线性^[8-9],结构相对简单,成本低廉,是一种应用新原理的小型位移传感器。其测量范围达到十几毫米,分辨率为79 nm^[1]。

氦氖激光器纳米测尺理想的工作状态是单纵模状态,但是在实际应用中,随着测量范围的增大,激光器腔长增加,纵模间隔将会减小,激光器将会进入双纵模工作状态。在单纵模状态时,氦氖激光器功率较低,出光较弱,测量范围较短,长期稳定性较差,在受到灰尘影响时,激光器的功率会下降甚至不出光,即使加了防尘装置也无法完全避免,这给仪器的使用带来不便。鉴于此,设计了新型的氦氖激光器纳米测尺,该纳米测尺使用较长的氦氖激光增益管,增加了激光器的功率,使氦氖激光器在双纵模状态下工作,同时使用猫眼逆向器,采用偏振混叠的方法^[11],并且从光学系统、机械系统和电路系统三个方面加以设计和改进,进而将其仪器化。

2 原理

2.1 双纵模功率调谐

利用频率分裂和模竞争可以观察到 He-Ne 激光器功率调谐特性^[10],图1是可以观察双纵模功率调谐现象的实验装置图^[11-13],图中T为氦氖激光增益管;M1为凹面输出腔镜;CER为猫眼逆向器;W1为增透窗片;Q为石英晶体;PBS为渥拉斯顿棱镜;D1、D2为光电探测器;C为信号处理电路;PZT为压电陶瓷。

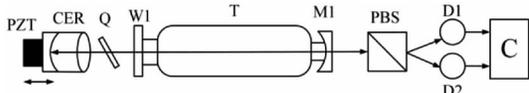


图1 双纵模功率调谐现象的实验装置图

Fig. 1 The experimental device for double longitudinal mode power tuning phenomenon

图2所示为双纵模功率调谐曲线,由图2可以看出o光和e光在一个周期里有两个交点H和L,这个交点称为等光强点,H点光强值大称为高等光强点,L点光强值小称为低等光强点,高、低等光强点交替出现,任意相邻的两个高等光强点之间便是一个纵模间隔,而且频率每变化一个纵模间隔对应腔长变化半个波长。

当激光器功率比较低时,双纵模功率调谐曲线的高等光强点和低等光强点之间的电压差比较大,图2所示就是功率比较低时的调谐曲线,当功率水平比较高时,典型的功率调谐曲线如图3所示,此时高等光强点和低等光强点之间的电压差比较小,两

个等光强点比较接近。从信号处理来看,应该选择图2所示的功率调谐曲线,只要在高、低等光强点之间设置一个阈值电压,只对阈值电压以上的信号进行处理,就可实现半波长内的四细分。但是,从实际测量来看,当激光器功率较低时,会导致位移测量系统的测量范围较小,而且出光不稳定,长时间放置容易不出光。所以,在实际测量时,应该选择图3所示的功率调谐曲线。

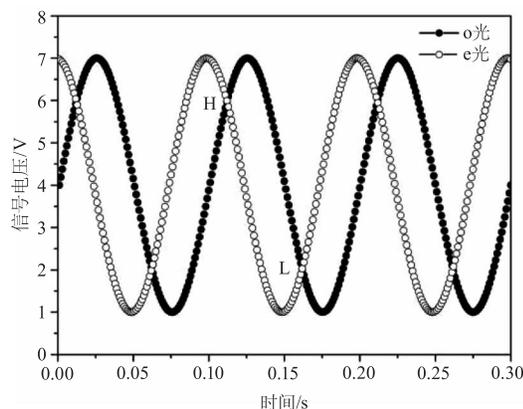


图2 双纵模功率调谐曲线

Fig. 2 Power tuning curve under dual longitudinal mode

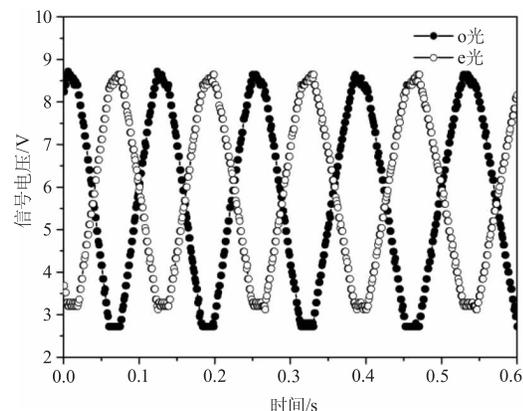


图3 实验结果的功率调谐曲线

Fig. 3 Experimental results of the power tuning curves

2.2 偏振混叠

偏振混叠的原理是^[11]:将o光和e光不等比例混合,形成另外两束光x光和y光,x光中包含部分o光和e光,y光中也包含部分o光和e光。假设比例混合因子为k,则x光包含比例为k的o光和比例为(1-k)的e光,同理,y光中包含比例为k的e光和比例为(1-k)的o光,故x光和y光的光强可表示为:

$$I_x = kI_o + (1 - k)I_e \tag{1}$$

$$I_y = kI_e + (1 - k)I_o \tag{2}$$

其中,k为比例因子,0 ≤ k ≤ 1,k的取值不同可以得

到不同的功率调谐曲线,图4所示为 $k = 0, k = 0.1, k = 0.2, k = 0.3, k = 0.4, k = 0.45$ 时的功率调谐曲线。对图4(a)所示的功率调谐曲线进行仔细观察,可以发现一个周期内两处等光强点的信号电压并非完全相等,而是有一定的电压差,同时观察到图4(a)与图4(f)中两相邻等光强点的绝对电压差值相等,只是因为图4(a)中信号的整体幅度大,才显得两相邻等光强点幅度接近,而图4(f)中由于偏振混叠程度大,信号被大幅度压缩,但是两相邻等光强点之间的绝对电压差值没有改变,使得相邻高、低两等光强点的电压差在信号整体中占有较大的比例。因此用偏振混叠可以使得相邻高、低两等光强点的电压差保持不变而信号的整体幅度被大大压缩,这样就能够使高低等光强点被显著分开。

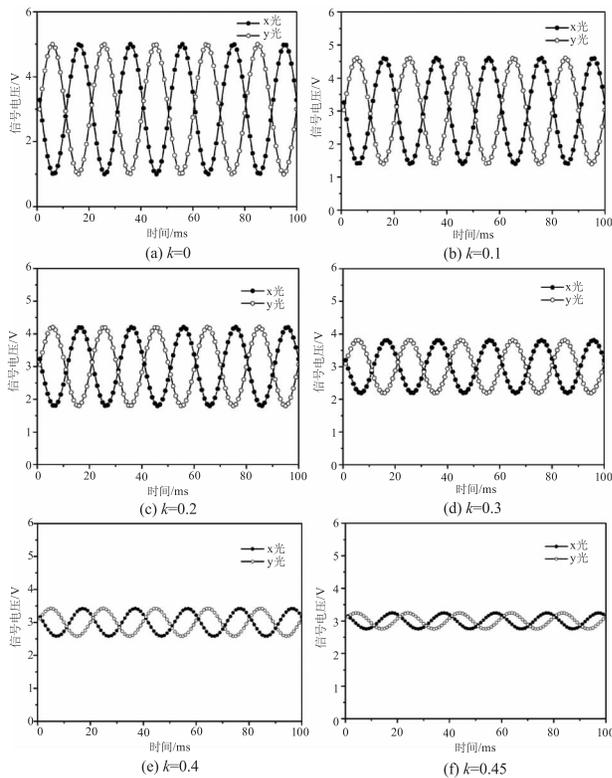


图4 不同混合比例的理论功率调谐曲线

Fig. 4 The theory power tuning curve under different mixing ratio

3 实验系统结构

本文设计了一种新型结构的 He - Ne 激光器纳米测尺系统,结构如图5所示,该系统采用半外腔结构,工作波长为 632.8 nm,采用较长的增益管,即增益管 T 长度为 150 mm,增益管内冲 He、Ne 混合气体, M1 为凹面输出腔镜,透过率为 0.6%, CER 为猫眼逆向器, PBS 为渥拉斯顿棱镜, Q 为石英晶体, W1 为增透窗片, G 为高压电路, PZT 为压电陶瓷, PC 为计算机, S 为测杆, D1、D2 为光电探测器, C 为信号

处理电路。计算机通过高压电路 G 控制并驱动压电陶瓷,测杆通过压电陶瓷的变化来推动猫眼逆向器 CER 移动,产生的光信号通过腔镜 M1 端射出,射出的光经渥拉斯顿棱镜 PBS 分光后,由 PIN 探测器 D1、D2 分别接收,然后进入机箱 C 进行信号处理并显示位移大小。

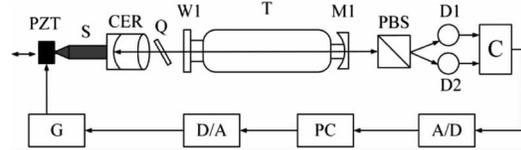


图5 氦氖激光器纳米测尺系统

Fig. 5 He-Ne laser nanometer ruler system

机箱 C 是纳米测尺系统仪器化的重要部分,其电路系统采用模块化设计,每一个模块完成一项独立的功能,其电路系统处理框图如图6所示,包括以下几个部分:光电转换及放大电路,高通滤波电路,等光强点判断电路,浮动阈值生成电路,计数与判向电路,单片机控制系统和数码显示电路。计数与显示模块主要实现对测量信号的计数与显示。系统中采用的是复杂可编程逻辑器件 CPLD 与单片机 8051 相结合的处理方案。其中, CPLD 的处理速度快,主要负责完成对信号的采集与计数。采集到的数据由接口电路传输到 8051 单片机,单片机再将得到的脉冲计数转换成位移量,得到的位移量送到数码显示电路,最后在机箱上进行显示。

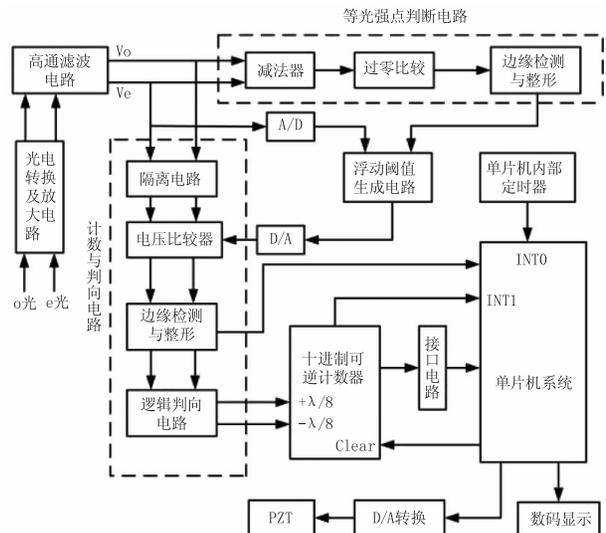


图6 电路系统处理框图

Fig. 6 Schematic diagram of electronic design

4 实验现象与实验结果分析

4.1 实验现象

压电陶瓷推动测杆移动使其改变激光谐振腔的腔长,腔长的变化产生了正交偏振光,正交偏振光入

射到渥拉斯顿棱镜上,经过渥拉斯顿棱镜分光后,由PIN探测器D1、D2分别接收,之后将接收到的信号进行放大、滤波并接在示波器上观察。图7所示是不同混合比例的实验功率调谐曲线,由图7(a)到图7(f)的变化中可以看出,双纵模功率调谐曲线在一个周期内高、低等光强点之间的相对电压差值并未改变,但是信号的整体幅度逐渐被压缩,从而逐渐使得相邻高、低等光强点的电压差在信号整体中占有较大的比例,最终就形成了图7(f)中所显示的图形,即相邻高、低两等光强点的电压差在信号整体中占有较大的比例,使得高、低等光强点被显著分开,这样就形成了有利于后续电路处理的调谐曲线。

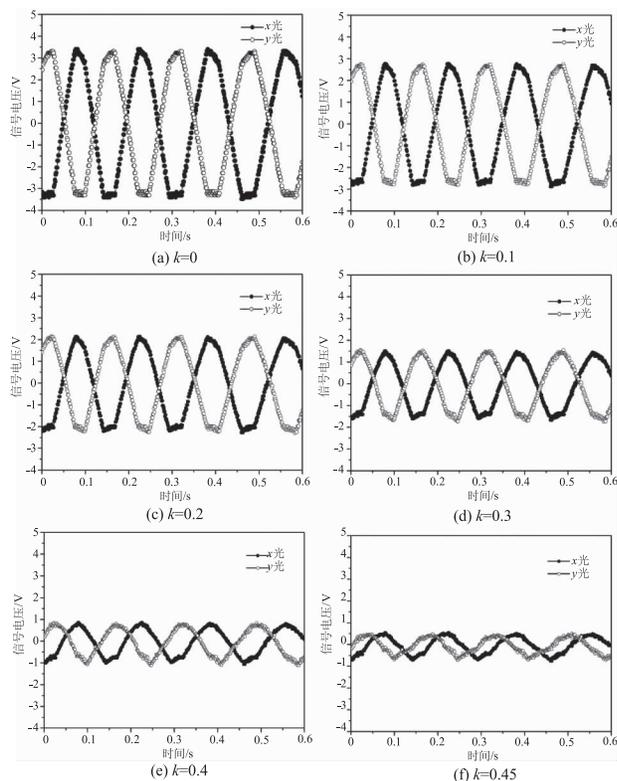


图7 不同混合比例的实验功率调谐曲线

Fig. 7 The experimental power tuning curve under different mixing ratio

图8所示是将之前得到的图7(f)信号放大4倍后的功率调谐曲线,图9所示是将图8经过阈值电压 U_{th} 处理之后的双纵模功率调谐曲线,经过阈值电压处理之后的双纵模功率调谐曲线形如单纵模功率调谐曲线,可以清晰的看到一个周期被分为四个区: y 光区(AB 区域)、 x 光和 y 光共存区(BC 区域)、 x 光区(CD 区域)、无光区(DE 区域),每一个区对应一种偏振态,一个周期里四个区对应四种不同的偏振态,每当电路系统探测到一个偏振态的改变

时,表示腔镜的移动量就是 $\lambda/8$, 即 79 nm, 然后对 $\lambda/8$ 的位移量进行脉冲计数, 最终就可以得到腔镜的位移量。

采用偏振混叠方法,不仅可以显著增加高低等光强点的相对距离,而且可以方便地对各细分区间的宽度进行调节,把每个周期分为大小相等的四个区间,而且并未改变相邻高低等光强点的横向位置,不会因为使用偏振混叠方法给测量带来误差,测量结果准确。

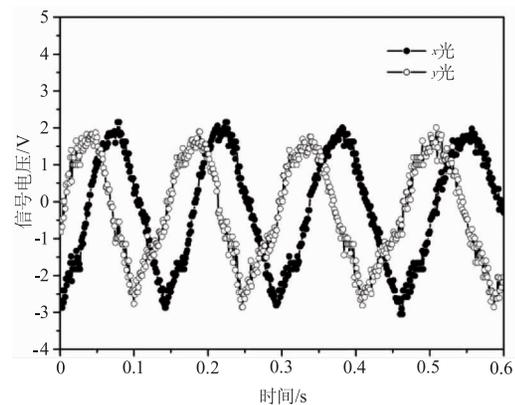


图8 放大图7(f)的实验功率调谐曲线

Fig. 8 The experimental power tuning curve of amplified figure 7(f)

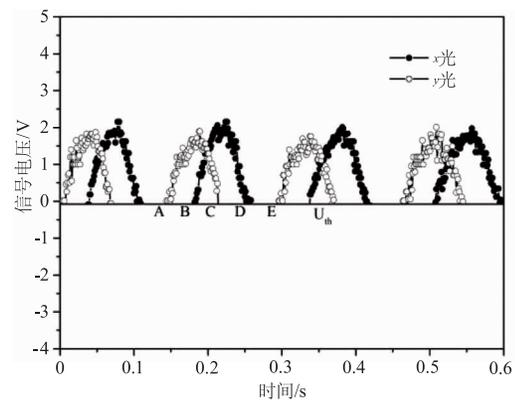


图9 经过阈值电压处理的实验功率调谐曲线

Fig. 9 The experimental power tuning curve under threshold processing

4.2 比对实验装置与比对测量

对纳米测尺进行了实验测试,将氦氖激光器纳米测尺与HP5529A型双频激光干涉仪进行比对实验,比对实验装置如图10所示。将HP5529A型双频激光干涉仪的靶镜安装在一维平移台上,同时将纳米测尺的测杆顶在被测物体上,并且尽量保证干涉仪的测量光路和纳米测尺系统的测杆轴线在同一条水平线上,从而尽可能的减少阿贝误差。当一维平移台移动时,以1 mm为位移步距,同时记录下双频激光干涉仪和纳米测尺的示数,从而实现二者的

比对测量。以双频激光干涉仪的测量数据为基准,将其测量值记录为 X_i ,同时记录纳米测尺系统的位移测量值为 Y_i 。激光干涉仪从 0 mm 移动到 20 mm 过程中,一共记录了 20 组位移值,如表 1 所示。

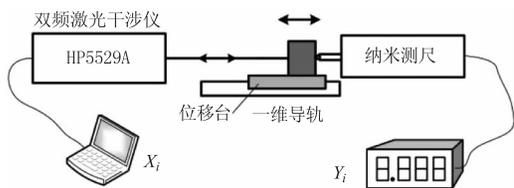


图 10 比对实验装置图

Fig. 10 Schematic diagram of the setup for comparison experiment

表 1 氦氖激光器纳米测尺系统与 HP5529A 比对结果

Tab. 1 Experimental result comparison between He-Ne laser nanometer ruler system and HP5529A

No.	X_i/mm	Y_i/mm
1	1.000156	0.999032
2	2.000385	1.998778
3	3.000577	2.998918
4	4.000772	3.999692
5	5.000651	5.000386
6	6.000887	6.000605
7	7.000952	7.000746
8	8.001025	8.001124
9	9.001106	9.001977
10	10.001568	10.002749
11	11.001963	11.003366
12	12.002089	12.003664
13	13.002208	13.003963
14	14.002363	14.004183
15	15.002379	15.004163
16	16.002409	16.004215
17	17.002438	17.004513
18	18.002573	18.004811
19	19.002657	19.005030
20	20.002591	20.003827

4.3 实验分析

拟合曲线,采用最小二乘法对实验数据 20 个测量点进行拟合,拟合曲线如图 11 所示,拟合曲线方程为:

$$Y_i = 1.000209 X_i - 0.001496 \quad (3)$$

所得相关系数为 0.9999999624。

将最小二乘拟合结果中各点的预测值与原始的测量数据相比较,可得各点的线性偏差 Δy_i (即残差)。设残差的最大值为 Δy_{\max} ,那么纳米测尺系统的线性度可以表示为:

$$L_i = \frac{\Delta y_{\max}}{|Y_{\max} - Y_{\min}|} \times 100\% \quad (4)$$

计算结果表明,该系统的线性度为 5.8×10^{-5} 。

测量结果的标准差是测量精度的一个重要技术指标,测量结果标准差 s 可表示为:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \Delta y_i^2}{n-2}} \quad (5)$$

计算结果表明,该系统的标准差为 520 nm。

综上所述,基于偏振混叠的氦氖激光器纳米测尺系统目前达到的指标:分辨率为 79 nm;量程为 20 mm;线性度为 5.8×10^{-5} ;标准差为 520 nm。

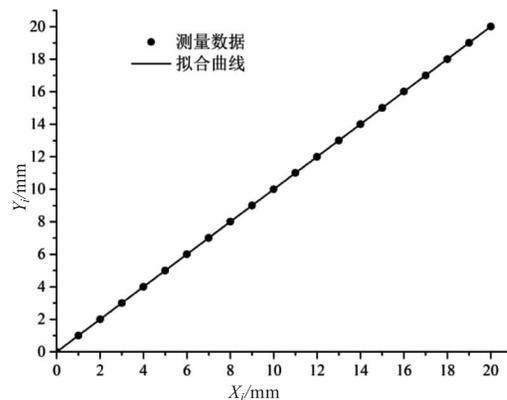


图 11 拟合曲线

Fig. 11 Fitting curve

5 结论

研制了一种基于偏振混叠的氦氖激光器纳米测尺系统,该系统采用大功率双频激光器进行位移测量,使用的增益管长 150 mm,腔长在 180 ~ 200 mm 之间变化,即量程为 20 mm,在量程范围内的功率调谐曲线全部是双纵模功率调谐曲线。本系统采用偏振混叠方法,在不增加任何系统成本和电路复杂度的前提下,使得一个周期内相邻高、低两等光强点的电压差保持不变,信号的整体幅度大幅缩小,从而使相邻高、低两等光强点的电压差在信号整体中占有较大的比例,使得相邻高、低等光强点显著分开,方便了信号处理,有效避免了由于两个等光强点在整体信号中距离过近导致误计数引起的测量误差,大大提高了纳米测尺的精

度和稳定性。通过与激光干涉仪的比对实验表明,该系统的分辨率为 79 nm,量程为 20 mm,线性度为 5.8×10^{-5} ,标准差为 520 nm。本文所述的偏振混叠方法不仅适用于氦氖激光器纳米测尺,而且还可以广泛的应用于其他激光位移测量的信号处理过程中,具有广阔的应用前景。

参考文献:

- [1] ZHANG Shulian. Principle of laser nano-meter measurement ruler[J]. Engineering Science, 2005, 7(3): 27 - 34. (in Chinese)
张书练. 激光器纳米测尺原理[J]. 中国工程科学, 2005, 7(3): 27 - 34.
- [2] ZHANG Shulian, LI Kelan, WU Minxian, et al. The pattern of mode competition between two frequencies produced by mode split technology with tuning of the cavity length[J]. Optics Communications (S0030 - 4018), 1992, 90(4): 279 - 282.
- [3] DU Wenhua, ZHANG Shulian, LI Yan. Principles and realization of a novel instrument for high performance displacement measurement-nanometer laser ruler[J]. Optics & Lasers in Engineering, 2005, 43: 1214 - 1225.
- [4] HAN Yanmei, ZHANG Shulian, LI Kelan. Preventing output power rise and fall in an extra-shortened laser by equal-spacing mode splitting technology[J]. Optical Engineering(S0091 - 3286), 1996, 35(7): 1957 - 1959.
- [5] ZHANG Shulian. Principle of orthogonal polarization lasers[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005. (in Chinese)
张书练. 正交偏振激光原理[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
- [6] FU jie, ZHANG Shulian, HAN Yanmei, et al. Mode suppression phenomenon in a mode splitting He-Ne laser[J]. Chinese Journal of lasers, 2000, B9(6): 499 - 503.
- [7] ZHANG Shulian, JIN Yuye, FU Jie, et al. Mode suppressing, its elimination and generation of small frequency-difference in birefringence He-Ne lasers[J]. Optical Engineering, 2001, 40(4): 5940597.
- [8] YANG Sen, ZHANG Shulian. The frequency split phenomenon in a He-Ne laser with a rotation quartz crystal plate in its cavity[J]. Optics Communications, 1988, 68: 55 - 57.
- [9] ZHANG Shulian, GUO Hui, LI Kelan, et al. Laser longitudinal mode splitting phenomenon and its applications in laser physics and active metrologysensors[J]. Optics and Lasers in Engineering, 1995, 23: 1 - 28.
- [10] LI Yan, FU Jie, ZHANG Shulian, et al. Displacement sensing He-Ne laser based on intensity tuning with $\lambda/8$ accuracy and self-calibration [J]. Laser Technology, 2000, 24(6): 337 - 340. (in Chinese)
李岩, 傅杰, 张书练, 等. He-Ne 激光器功率调谐位移传感激光器[J]. 激光技术, 2000, 24(6): 337 - 340.
- [11] ZHAO Zhengqi, ZHANG Shulian, ZHANG Peng, et al. Displacement sensor based on polarization mixture of orthogonal polarized He-Ne laser at 1. 15 μm [J]. Chin. Opt. Lett., 2012, 10(3): 032801.
- [12] LI Yan, ZHANG Shulian, HAN Yanmei. Displacement sensing He-Ne laser with $\lambda/8$ accuracy and self-calibration[J]. Opt. Eng. 2000, 39: 3039 - 3043.
- [13] JIN Yuye, ZHANG Shulian, LI Yan, et al. Zeeman Birefringence Dual Frequency Lasers[J]. Chinese Physic Letters(S0256 - 307X), 2001, 18(4): 533 - 536.