

# He-Ne 激光器功率调谐位移传感激光器

李 岩 傅 杰 张书练 韩艳梅 金国藩

(清华大学精密仪器系精密测试技术与仪器国家重点实验室, 北京, 100084)

**摘要:** 阐述了一种新型的 He-Ne 激光位移传感器, 具有自校准功能以及没有原理上的误差。利用频率分裂技术, 将一个纵模间隔分为 4 个宽度相等的区间, 在这 4 个区间内激光器具有不同的光功率输出。当一个频率移动过这样的一个区间, 相当于激光器的一个腔镜移动了  $\lambda/8$ 。可移动的反射镜与被测工件相连。这样, 一支 He-Ne 激光器变成了一个不用干涉现象的位移传感器, 其测量范围可达 10mm, 测量精度可达  $0.079\mu\text{m}$ , 并具有判向的功能。

**关键词:** 频率分裂 位移测量与传感 He-Ne 激光 纵模间隔

## Displacement sensing He-Ne laser based on intensity tuning with $\lambda/8$ accuracy and self-calibration

Li Yan, Fu Jie, Zhang Shulian, Han Yanmei, Jin Guofan

(State Key Laboratory of Precision Measurement Technology and Instrument,  
Department of Precision Instrument, Tsinghua University, Beijing, 100084)

**Abstract** The principle is presented and demonstrated of using a single He-Ne laser to sense displacement without nonlinear error in principle, and with function of self-calibration. By using frequency splitting technology, we could separate a mode interval into four equal-width ranges with different intensity characteristics. One cavity mirror of the laser moves  $\lambda/8$  along the laser axis when a laser frequency crosses one such range. The moving mirror contacts with and is moved by the object to be measured. Thus the He-Ne laser becomes a displacement sensor without using interference phenomenon which works with accuracy of  $0.079\mu\text{m}$ , 10mm measuring range, and function of distinguishing direction.

**Key words:** frequency splitting displacement measurement and sensing He-Ne laser mode spacing

### 引 言

在激光物理中, 有一种现象, 称之为“如果激光腔镜移动半波长, 则激光频率移动一个纵模间隔”。该现象有潜在位移测量功能, 有显而易见的简单性和准确性, 但这 30 年却未被利用。或许是因为无法判向, 无法实现可逆计数, 故无人研究。

### 1 原 理

利用频率分裂 He-Ne 激光器功率调谐特性, 使我们终于找到位移测量中关键要解决的判定位移方向的方法。位移传感 He-Ne 激光器结构见图 1, 图中 T 为放电管,  $M_1, M_2$  为腔镜(腔长 140mm), W 为增透窗片, F 为压力, PS 为渥拉斯顿棱镜,  $D_1, D_2$  为光电探测器,  $A_1, A_2$  为放大器, DD 为位移显示。

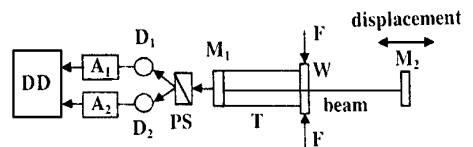


Fig. 1 Displacement sensing He-Ne laser setup

在调谐双折射双频激光器腔长时,由于激光模竞争效应,如果 $o$ 光比 $e$ 光先进入出光带宽, $o$ 光将抑制后进入出光带宽的 $e$ 光,形成一个远比此双折射双频激光两频率之差大得多的 $o$ 光工作区域。反之,如果 $e$ 光比 $o$ 光先进入出光带宽,则形成一个远比两频率之差大得多的 $e$ 光工作区域。

我们研究了上述现象,得出如下结论:如果移动一个双折射双频激光腔镜时,激光出光带宽被分成3部分: $o$ 光区, $o$ 光 $e$ 光共存区, $e$ 光区。

如果用一个渥拉斯顿棱镜(或偏振分光镜)将 $o$ 光, $e$ 光分开并照射到一个屏上的两点,在移动一激光腔镜时,可顺序看到:一点被照亮 $\rightarrow$ 两点同时被照亮 $\rightarrow$ 另一点被照亮,如此反复。进一步实验证明,这3个区域的宽度可以由激光分裂的大小(两频率之差)控制。这个结论是以前未见报道过的,同时也为实现位移传感 He-Ne 激光器带来了可能。最终,我们通过下述步骤实现了位移传感 He-Ne 激光器:

(1)在单频 He-Ne 激光器腔内加入双折射元件,使激光频率分裂,单频激光变成双频激光。在激光放电管的窗片上套一个压紧圈,压紧圈沿窗片直径施加了一个力 $F$ 。此力在窗片内部产生应力双折射,应力双折射的出现把几何长度唯一的激光谐振腔变成具有两个物理长度的谐振腔。于是引起了激光频率分裂,即一个频率变成两个(一个 $o$ 光频率,一个 $e$ 光频率),两个频率之差为:

$$\Delta\nu = 8cF / (\pi L D f_0) \quad (1)$$

式中, $c$ 为光速; $L$ 为激光腔长; $D$ 为窗片直径; $f_0$ 为窗片材料条纹系数。

这种方法可使两个频率之差在40MHz到1000MHz之间变化。

(2)选择激光增益管长度(控制增益)和激光腔长(控制激光纵模间隔)使纵模间隔和出光带宽之比为4:3。由 $\Delta = c / (2L)$ 可知,减小腔长 $L$ 可使激光纵模间隔 $\Delta$ 增加,以至于达到激光纵模间隔与激光出光带宽比为4:3。也可在激光腔内放入一衰减片,借增加激光腔损耗适当减小出光带宽。减小腔长和适当增加腔损耗两种措施配合达到上述的4:3比例。或说在一个纵模间隔中,有1/4区域没有激光输出。

(3)选择频率分裂量大小,使出光带宽分为3个宽度相等的区域: $o$ 光振荡区, $o$ 光和 $e$ 光共同振荡区, $e$ 光振荡区。在调谐激光腔长时,两频率之间出现强纵模竞争,即由于两频率之间的间隔仅几十MHz,所以,两频率出现在激光放大介质增益线的同一个烧孔之内,争夺烧孔内的粒子反转数。在激光腔调谐中,如果 $o$ 光频率先进入出光带宽内,它占有全部粒子反转数以供自己振荡。 $e$ 光进入出光带宽后,由于全部粒子反转数被 $o$ 光占据, $e$ 光不能振荡。只有当两频率较为靠近增益中心,它们获得的总增益增大到足够维持共同振荡时, $e$ 光才开始振荡。由于 $e$ 光夺去了相当多粒子反转数, $o$ 光的增益被减少,功率下降。由于这种 $o$ 光对进入出光带宽的 $e$ 光的抑制作用,形成一个远比频差 $\Delta\nu$ 宽得多的 $o$ 光工作区域。反之,如果 $e$ 光比 $o$ 光先进入出光带宽,则形成一个远比频差 $\Delta\nu$ 宽得多的 $e$ 光工作区域。当加于窗片上的力 $F$ 大小合适时(即频率分裂量大小合适),移动激光腔镜 $M_2$ ,则发现出光带宽被分成3等分(见图2): $o$ 光区, $o$ 光和 $e$ 光共同振荡区, $e$ 光区。同时在移动 $M_2$ 时(图1)可顺序看到: $D_1$ 被照亮、 $D_2$ 暗 $\rightarrow D_1, D_2$ 同时被照亮 $\rightarrow D_1$

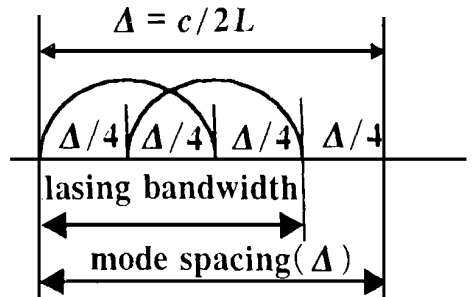


Fig. 2 Ratio of mode spacing to lasing bandwidth is 4:3, lasing bandwidth is equally divided by three

同时,在移动 $M_2$ 时(图1)可顺序看到: $D_1$ 被照亮、 $D_2$ 暗 $\rightarrow D_1, D_2$ 同时被照亮 $\rightarrow D_1$

暗,  $D_2$  被照亮  $\rightarrow D_1, D_2$  都暗  $\rightarrow D_1$  被照亮,  $D_2$  暗, 如此反复循环。每循环一次, 反射镜走了一个  $\lambda/2$ , 每走过一个区, 反射镜走了  $\lambda/8$ 。对  $0.6238\mu\text{m}$ ,  $\lambda/8$  是  $0.079\mu\text{m}$ 。

(4) 当一个激光反射镜由被测物推动位移时, 得到 4 个宽度相等的区域: o 光振荡区, o 光和 e 光共同振荡区, e 光振荡区, 无光区域。我们分别用 o, e, oe, z 表示上述 4 个状态。每个区域对应反射镜  $1/8$  波长位移, 即  $0.079\mu\text{m}$ ;

(5) 判向可由电路按 4 个区光偏振的不同性质实现。设激光反射镜向正向移动时, o 光超前 e 光, 即出现  $o \rightarrow oe \rightarrow e \rightarrow z \rightarrow o \dots$  的状态循环, 则激光反射镜向负向移动时, e 光超前 o 光, 即出现  $e \rightarrow oe \rightarrow o \rightarrow z \rightarrow e \dots$  的状态循环。利用这一特性, 通过逻辑电路可实现判向和可逆计数。每个脉冲当量是  $\lambda/8$ 。

## 2 结 构

在实际应用时, 位移自传感 He-Ne 激光器的可运动反射镜通过两种方式和被测物体相接。图 3 是第一种结构。反射镜

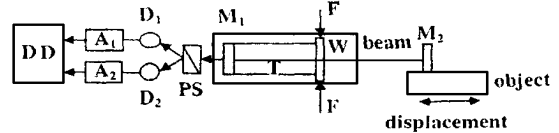


Fig. 3 Scheme 1: mirror  $M_2$  is attached on a moving object which is to be measured

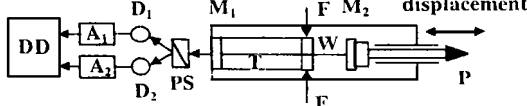


Fig. 4 Scheme 2: mirror  $M_2$  is attached with a sliding probe P which is pushed by an object to be measured

$M_2$  被置于被测工件上(如微动台), 被测工件位移时, 激光器测出工件位移。图 4 是第二种结构。反射镜  $M_2$  固定在滑动导轨(即测杆)上。弹簧把测杆顶压在被测工件上。被测工件移动带动  $M_2$  位移, 激光器测出工件位移。

第一种结构要求激光放电管部分和被测工件之间要有较好的静态稳定度, 第二种结构使用热膨胀系数小的融石英壳做激光腔体, 有效的防止温度对激光腔长的影响产生误差。融石英的热膨胀系数是  $5 \times 10^{-7}$ , 以激光腔长  $140\text{mm}$  计算, 温度每升高  $1^\circ\text{C}$ , 腔长改变  $0.07\mu\text{m}$ , 和  $\lambda/8$  近似相等。所以, 一次测量过程的温度变化不能超过  $1^\circ\text{C}$ , 这是一个要求不高的条件。

图 3 的结构测量范围大, 可达  $10\text{mm} \sim 20\text{mm}$ 。但是它不够灵活, 因为一个反射镜必须放在被测工件上。图 4 的结构属便携式, 使用方便, 但需要一个高精度导轨, 精度不高的导轨在运动中有晃动, 易导致反射镜失谐, 激光停振。因此, 它的测量范围受导轨精度限制。

## 3 实验结果

对频率分裂 He-Ne 功率调谐位移自传感系统进行了实验测试。比对仪器采用美国 HP 公司的双频激光干涉仪 5528A。用 5528A 和频率分裂 He-Ne 功率调谐位移传感系统同时测量一个位移工作台, 以约  $0.2\text{mm}$  为位移步距, 在自传感系统位移范围内, 同时记录双频激光干涉仪的示值  $X_i(\text{mm})$  和位移传感系统对应的示值  $Y_i(\text{脉冲数})$ , 测量数据见表 1。

用最小二乘法对所测数据进行直线拟合, 并求得各测量点的线性偏差。求各测量点  $Y_i$  与最小二乘估计值  $y_i$  的差值  $v_i$ , 设各差值的最大值为  $\Delta y_{\text{max}}$ , 则:

$$[\Delta y_{\text{max}} / (Y_n - Y_1)] \times 100\% \quad (2)$$

即为传感器的线性度。该传感系统测量误差的标准差为:  $\sigma = [\sum v_i^2 / (n - 2)]^{1/2}$  (3)

取  $2\sigma$  为位移自传感激光器重复性误差(置信度  $a = 95\%$ )。再由最小二乘法直线的斜率, 换算出脉冲分辨率(脉冲当量)。

实验表明,该传感激光器的测量范围  $7.8\text{ mm}$ , 脉冲分辨率为  $0.07906\text{ }\mu\text{m}$ , 线性度为  $0.0033\%$ , 测量误差  $2\sigma = 0.218\text{ }\mu\text{m}$ 。

对该位移自传感激光器的温度漂移进行了测试。开机预热  $20\text{ min}$ , 每隔  $5\text{ min}$  记录一次输出数据的变化, 共测  $60\text{ min}$ 。结果  $60\text{ min}$  内零点漂移不大于 2 个脉冲, 相当于每小时  $0.16\text{ }\mu\text{m}$ 。

## 4 结 论

在国家教委的资助下(清华大学科研处给了一定

预先资助), 我们完成了“频率分裂 He-Ne 激光器功率调谐特性及位移传感激光器”的研究。这是一项计量领域内、从原理到技术均为独创的研究成果。本成果综合利用几种我们发明、发现的激光物理现象, 从一支普通 He-Ne 激光器演变成一种测量位移的传感器。它具有的特点是: (1) 结构简单。所用激光器自身变成了位移传感器(正因如此, 我们叫它“位移自传感 He-Ne 激光器”), 比激光干涉仪结构简单, 造价低。(2) 有较高的测量精度。它的分辨率为  $1/8$  波长。对于  $633\text{ nm}$  波长 He-Ne 激光, 它的分辨率是  $0.079\text{ }\mu\text{m}$ 。(3) 线性度好。它以“激光腔镜移动半波长频率移动一个纵模间隔”为测量原理, 在任何测量范围内都成立, 因此没有原理上的非线性误差。(4) 可溯源到光波长。我们研制成的位移传感 He-Ne 激光器系统是以“激光腔镜移动半波长、激光频率移动一个纵模间隔”为工作原理。这类类似于激光干涉仪中的“半波长位移出现一个干涉条纹”。因此, 我们的位移传感器也可作为计量标准使用。有很多种位移传感器, 如电容位移传感器、电涡流位移传感器、电感全移传感器, 它们都有原理上的非线性, 线性测量范围较小并需要校准。(5) 它不必 A/D 转换就能脉冲输出, 易于和被测物体的加工控制机构结合。

经过部分单位试用, 取得了较为满意的结果。此传感器造价低、精度高、数字输出、线性度好、溯源性好等优良特性, 有较好的应用前景。

## 参 考 文 献

- 1 Zhang Sh L, Guo H, Li KL *et al.* Optics and Lasers in Engineering, 1995; 23: 1~ 28
- 2 Han Y M, Zhang Sh L, Li Y. Chinese Journal of Lasers, 1998; B7(3): 193~ 198
- 3 Holzapfel W, Settgast W. Appl Phys, 1989; B49: 69~ 72
- 4 Siegman A E. Lasers. Chapter 25, Mill Valley, Calif: University Science Books, 1986
- 5 Zhang Sh L, Li D Sh. Appl Opt, 1988; 27(1): 20~ 21
- 6 Zhang Sh L, Wu M X, Jin G F. Appl Opt, 1990; 29: 1265~ 1267

Table 1 Experiment results

measurement data			measurement data			measurement data		
No.	$X_i$	$Y_i$	No.	$X_i$	$Y_i$	No.	$X_i$	$Y_i$
01	-0.0005	0	15	2.7951	35358	29	5.5924	70732
02	0.1876	2378	16	2.9881	37798	30	5.7988	73344
03	0.3914	4955	17	3.1924	40380	31	5.9874	75732
04	0.6029	7631	18	3.3941	42932	32	6.1938	78338
05	0.7902	10000	19	3.5922	45437	33	6.396	80896
06	0.9892	12515	20	3.8015	48085	34	6.5941	83401
07	1.1935	15100	21	3.9934	50512	35	6.8006	86013
08	1.3915	17603	22	4.1883	52978	36	7.0013	88551
09	1.5913	20132	23	4.3891	55518	37	7.1967	91023
10	1.7964	22726	24	4.6028	58220	38	7.3876	93438
11	1.9971	25264	25	4.7848	60521	39	7.6063	96204
12	2.187	27669	26	4.9852	63055	40	7.7983	98631
13	2.3909	30246	27	5.1952	65711			
14	2.5903	32768	28	5.3884	68156			

# 激光光束质量参数测量的实验研究

赵长明

(北京理工大学光电工程系, 北京, 100081)

**摘要:** 采用 CCD 系统实验测量了 LD 泵浦 Nd:YAG 激光器的光束质量参数, 研究了 CCD 系统的背景噪声特性和积分区域选取对光束质量参数测量的影响, 从实验数据中得到以下结论: (1) 在有、无背景光两种条件下, 背景记数强烈地依赖于曝光时间和像素的合并, 温度影响可以忽略不计; (2) 为获得  $M^2$  合理的测量结果, 至少要选择 5% 积分区域。

**关键词:**  $M^2$  因子 CCD 摄像机 光束质量

## Investigation on the experimental measurement of laser beam quality

Zhao Changming

(Dept. of Optical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing, 100081)

**Abstract:** The beam quality of a LD pumped Nd:YAG laser is measured with CCD camera system. The background characteristics of the CCD system and the influence of the size of integral box upon measurement results are investigated. The following conclusions can be derived from experimental results: (1) Background is strongly depend upon exposure time and pixel binning, while temperature has an ignorable effect upon it, whether with or without ambient light. (2) A 5%-cut is the minimum value in order to get a reasonable result.

**Key words:**  $M^2$  factor CCD camera Beam quality

## 引 言

激光光束质量参数, 即  $M^2$  因子的测量是近几年研究的一个热点。ISO 建议的测量方法包括二维面阵探测系统或二维单元扫描系统、套孔法、移动刀口法和移动狭缝法<sup>[1]</sup>。用以电荷耦合器件 (CCD) 为代表的面阵探测器件测量激光光束质量参数具有速度快、数据量大和易于计算机处理的优点, 特别是对于脉冲激光的测量具有特殊的优势。CCD 器件用于定量测量存在的问题是: 直流基线漂移和随机噪声。因为基于二阶矩方法定义的束宽是以距离平方作为积分权重的, 远离光束中心的随机噪声会对积分结果产生较大的影响<sup>[2]</sup>, 为此, 测量中要适

7 Zhang Sh L, Lu M, Wu M X *et al.* Opt Commun, 1993; 96(4): 245~ 248

8 韩艳梅, 张书练, 李克兰. 激光技术, 1997; 21(2): 111~ 114

9 Zhang Sh L, Li K L, Wu M X *et al.* Opt Commun, 1992; 90: 279~ 282

作者简介: 李 岩, 男, 1963 年 5 月出生。博士, 副教授。从事激光及光电系统的研究和光电仪器设计。

傅 杰, 男, 1973 年 10 月出生。硕士研究生。现主要从事频率分裂双频激光器技术及其应用方面的研究。

张书练, 男, 1945 年 10 月出生。教授, 博士生导师, 美国 OSA 会员。现主要的研究领域为光学与激光, 光电技术及系统的理论其应用。