

文章编号: 0253-2239(2006)06-0948-5

# 激光光场的大行程相位锁定及控制系统\*

王自鑫 谢向生 郭晶 李鸣 周建英

(中山大学光电材料与技术国家重点实验室, 广州 510275)

**摘要:** 提出了一种实现大行程飞秒激光脉冲对相位控制的方法。其设计思想是:在迈克耳孙干涉仪中,利用改变激光偏振态的方法改变输出两光束的光程差因子。在对 He-Ne 激光输出的两束光实现相位锁定的基础上,进而提出了一种可对于超短激光双脉冲相对相位差实现超大行程控制的方法。对 He-Ne 激光的动态相位锁定、以及飞秒激光脉冲对的相对相位差控制分别作了实验验证。对 He-Ne 激光的静态相位锁定结果表明干涉仪两臂光程差可以控制在纳米精度;而飞秒激光脉冲测量自相关曲线与理论拟合结果非常接近,经傅里叶变换可得到较好的单峰谱图。该系统能够在实验范围中几乎无行程限制地实现飞秒激光脉冲对的相对相位动态稳定控制。

**关键词:** 超快光学;超快光谱学;相位控制;反馈控制

中图分类号: O439 文献标识码: A

## Phase Locking and Control System of Laser Field Over a Large Range

Wang Zixin Xie Xiangsheng Guo Jing Li Ming Zhou Jianying

(State Key Laboratory of Optoelectric Material and Technology, Sun Yat-Sen University, Guangzhou 510275)

**Abstract:** A phase control method of femtosecond laser pulse pair over a large range is presented, which is based on the assumption that change of the laser polarization state affects the optical path difference factor of the two beams in the Michelson interferometer. Based on the phase locking of the two beams from the He-Ne laser, the relative phase difference control for femtosecond laser pulse pair is achieved over a large range. The dynamic phase locking for the beam from the He-Ne laser and the relative phase difference control for femtosecond laser pulse pair are validated experimentally. The former experimental result shows that the optical path difference of the two arms is controlled within nanometer scale. The measured autocorrelation curve of the femtosecond laser pulse fits the theoretical result well, and the Fourier transform shows a single-peak spectrum. The system can steadily achieve the relative phase difference dynamic control of the femtosecond laser pulse pair almost without limitation of range.

**key words:** ultrafast optics; ultrafast spectroscopy; phase control; feedback control

### 1 引 言

近几年来,随着超快激光技术的发展,基于相干光谱技术的相干控制<sup>[1,2]</sup>已成为在微观水平上实现化学、物理过程控制及进行探测研究的重要手段。随之飞秒超短激光脉冲间的相位控制也成为关键技术之一。在大的变化范围内实现超快激光脉冲对的相位锁定与控制,对于相干光谱分析<sup>[3,4]</sup>、傅里叶变换光谱仪<sup>[5]</sup>等技术的发展都有重要意义。本文提出的系统经验证可实现激光脉冲对的相位锁定及控制,并可根据需要实现精确的相干光谱测量。

纳米精度定位控制包括开环与闭环控制两类方

法<sup>[5,6]</sup>,开环定位控制方法结构简单、成本低,但在较宽频谱范围内受压电陶瓷电压-位移特性拟合曲线精度的限制,无法达到良好的线性度。采用闭环控制则可明显改善控制精度。纳米定位系统通常利用压电陶瓷作为微位移驱动器<sup>[7]</sup>,但压电陶瓷在较高电场的作用下将产生严重的非线性、迟滞和蠕变。加之采用较为复杂的方法实现定位,控制范围受到限制,无法达到大行程相位锁定及控制的要求。鉴此本文发展了结合步进马达与微位移器的新方法,使精确的相位控制行程在实验范围内几乎不受限制。并在技术上采用增量式 PID (Proportional-

\* 广州市科技计划(4205010)、广东省自然科学基金重点项目(036597)和国家重点基础研究项目(1999075200)资助课题。

作者简介:王自鑫(1976~),男,湖南新宁人,博士研究生,主要从事光电子学方面的研究。E-mail: wzx482623@163.com

收稿日期: 2005-08-18; 收到修改稿日期: 2005-11-19

integral-differential) 控制算法进行闭环控制, 提高了系统的线性度; 并利用迈克耳孙干涉系统作精确定位, 最终实现了超大行程的超快激光脉冲对相位锁定及持续稳定控制。

## 2 相位差控制理论

本系统采用迈克耳孙干涉系统作定位控制<sup>[8]</sup>, 其光路原理如图 1 所示。

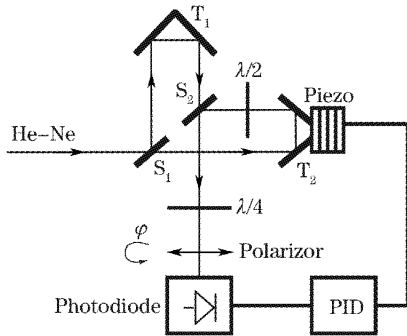


图 1 相位差控制系统原理光路图

Fig. 1 Principle of phase difference controlling system

如图 1 所示, 出射线偏光经迈克耳孙干涉仪, 其中一束经过以适当角度放置的  $1/2$  波片偏振面方向转过  $90^\circ$ , 之后两束光一起通过同样以适当角度放置的  $1/4$  波片, 分别变成左旋、右旋两束圆偏振光, 分别用矢量表示成为<sup>[9]</sup>

$$\begin{aligned} \mathbf{E}_1(t) &= \mathbf{E}_{1x}(t) + \mathbf{E}_{1y}(t) = \\ & E_1 x \cos \omega t + E_1 y \sin \omega t, \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{E}_2(t) &= \mathbf{E}_{2x}(t) + \mathbf{E}_{2y}(t) = \\ & E_2 x \cos(\omega t + \delta) + E_2 y \sin(\omega t + \delta), \end{aligned} \quad (2)$$

其中  $\delta$  为两束光在共线出射前由迈克耳孙干涉仪系统所引起的两束圆偏振光的相位差, 它的值由干涉仪的可动臂控制。这两个圆偏振光叠加以后, 其合矢量的  $x$  方向与  $y$  方向的分量可以写成

$$E_x = E_1 \cos \omega t + E_2 \sin(\omega t + \delta), \quad (3)$$

$$E_y = E_1 \sin \omega t + E_2 \cos(\omega t + \delta). \quad (4)$$

再通过一光轴方向与  $x$  方向夹角  $\varphi$  的检偏镜, 则两个分量在光轴方向上的投影矢量相加, 就可以得到通过检偏镜后光波的电场矢量, 电场平方即探测器可以接收到的光强:

$$\begin{aligned} I = E^2 &= [E_1 \cos(\omega t - \varphi) + E_2 \sin(\omega t + \delta + \varphi)]^2 = \\ & E_1^2 [1 + \cos 2(\omega t - \varphi)]/2 + \\ & E_2^2 [1 - \cos 2(\omega t + \delta + \varphi)]/2 + \\ & E_1 E_2 [\sin(2\omega t + \delta) + \sin(\delta + 2\varphi)]. \end{aligned} \quad (5)$$

考虑探测器的响应时间远远大于光波周期, 上式需对时间积分, 且把  $\delta$  换成  $-\delta$ , 探测器接收到的

信号表示成

$$\bar{I} = \frac{1}{2} (E_1 - E_2)^2 + 2E_1 E_2 \cos^2 \left( \frac{\delta}{2} - \varphi + \frac{\pi}{4} \right), \quad (6)$$

即探测得到的光强  $I$  是由两部分组成的: 一部分是直流项, 若分束镜能使两臂光强相等, 则此项为零; 另一部分是同迈克耳孙干涉仪的两臂间的光程差  $\delta$  及检偏镜的取向角  $\varphi$  有关的一余弦函数的平方。在此, 检偏镜偏转角度与干涉仪延时线差对于引入光程的影响是等效的, 这就方便我们利用检偏镜旋转控制延时, 以实现相位差的动态控制。

## 3 He-Ne 激光相位锁定系统的实验装置及实验效果

### 3.1 实验装置

我们设计的对 He-Ne 激光的相位锁定及相位控制系统的结构如图 2 所示。

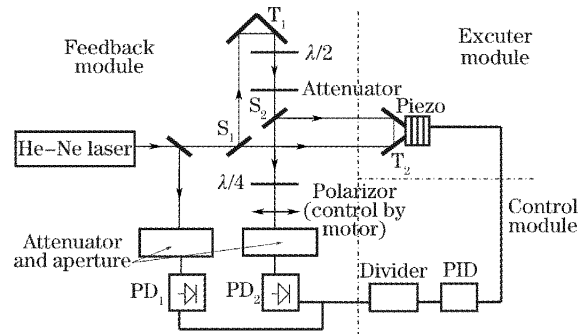


图 2 He-Ne 激光相位差控制系统结构图

Fig. 2 Structure of He-Ne laser phase difference controlling system

如图 2 所示, 本系统由反馈模块、执行模块、控制模块三部分组成。反馈模块采用迈克耳孙干涉仪产生定位控制信号, 探头 1 (PD1) 和探头 2 (PD2) 探测的模拟量通过单片机 AD 转换口进行采集; 到控制模块中经单片机进行数据处理后发令给执行模块, 执行模块执行后又改变了反馈光强。三者这样构成一个闭环控制, 对此采用增量式 PID 算法进行控制, 它能够快速地对模糊对象的控制。执行模块使用的压电微位移器可以纳米精度调整迈克耳孙干涉仪单臂长度, 响应速度达到毫秒量级, 与步进马达相结合, 可实现与检偏镜旋转同步的大行程连续匀速稳定的相位控制。

系统运行时在检偏镜匀速旋转的同时进行 PID 控制, 执行模块进行补偿, 控制两臂 He-Ne 光的相对相位差 (对外界随机干扰可迅速消除)。随着检偏

镜的匀速旋转[改变(4)式中的  $\varphi$  角],干涉仪两延时线也随之相对匀速变化(改变  $\delta$ )。这样,系统即可实现相对相位差的匀速控制。

### 3.2 实验结果

图 3 为在检偏镜匀速转动及控制模块匀速补偿的同时,系统对 He-Ne 激光相对相位差的锁定效果。光强探测点为干涉条纹图像的某一点,光强的起伏对应于两臂激光相位的相对变化。

图 3(a)中,随着检偏镜旋转,PID 控制值保持在 129~130 间变化,其精度为  $1/255$ 。由(6)式可知,当锁定相位时,  $I = I_{\max}/2$ ,光强值与两臂总相位差可看作线性关系,而总相位差  $\Delta\Phi = (2\pi/\lambda) \cdot 2\Delta d$ ,可以推

出本系统的控制精度  $\frac{1}{255} \times \frac{\lambda}{2\pi}$  约为 0.25 nm(此结果是理论值,实验中由于有其他因素的影响而达不到这个精度)。由此可见系统可以在检偏镜匀速旋转的同时进行实时补偿,稳定地实现相位锁定。如果对迈克耳孙干涉仪实施一个外加机械干扰,PID 运算能够很快地感应扰动,将控制量反馈至微位移器进行补偿,如图 3(b)可以看出,相对相位在 0.5 s 内即恢复锁定状态。而图 3(c)显示不加控制时的效果,相对相位在  $(0, 2\pi)$  之内随机起伏。可见,本系统对于 He-Ne 激光可以较理想地实现相对相位差的稳定控制。

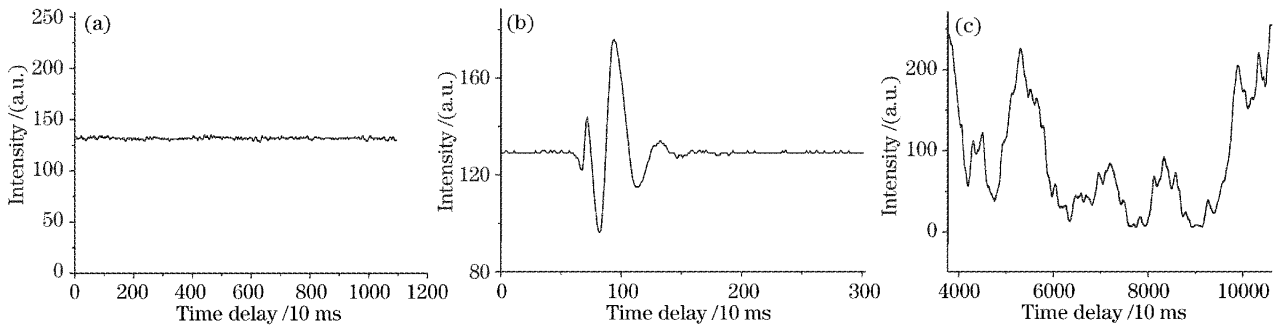


图 3 PID 控制效果图。(a)检偏镜旋转时的动态锁定图像,(b)在动态锁定情况下引入瞬时干扰的恢复图像,(c)不加 PID 控制时的图像

Fig. 3 The effect of PID controlling of the He-Ne laser relative phase difference. Dynamic locked with polarimeter rolling (a), dynamic locked and an instant mechanical disturb introduced (b), non-locked with no PID control (c)

## 4 飞秒激光相位控制系统的实验装置及其自相关曲线的测量

为了实现飞秒激光脉冲对相对相位差控制,我们搭建了双层的二维实验光路,上层为 He-Ne 激光光路,下层为与上层平行的飞秒激光脉冲光路。其中引入的 He-Ne 激光束与飞秒激光束在系统中

相对位置基本保持不变。通过锁定 He-Ne 激光束相位差,随着检偏镜匀速转动,系统控制两延时线相对匀速改变,从而达到控制下层的飞秒激光脉冲相位差匀速改变的效果。其工作原理图如图 4 所示。

本实验用来产生飞秒激光脉冲的是美国光谱物理公司的 KLM 掺钛蓝宝石飞秒激光器,产生中心

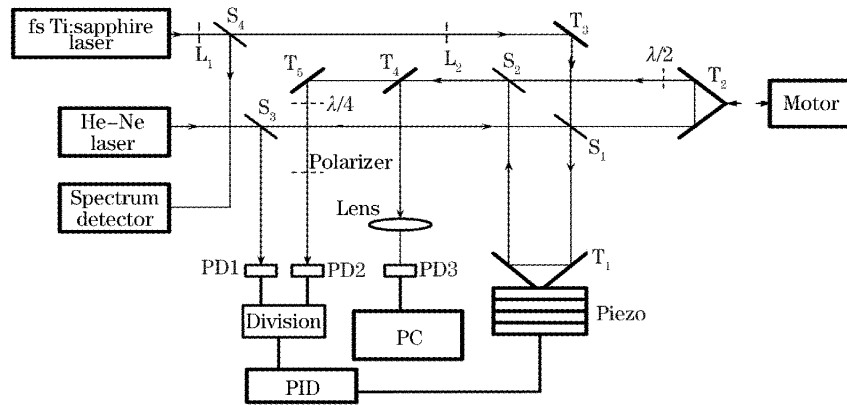


图 4 飞秒脉冲相位锁定系统工作原理图

Fig. 4 Structure of femtosecond laser pulse pair relative phase controlling system

波长800 nm、脉冲宽度为60 fs的飞秒脉冲列输出； $S_1$ 、 $S_2$ 为竖直方向的两片分别对632.8 nm和800 nm波长 $45^\circ R:T$ 为1:1的半反半透镜组； $S_3$ 、 $S_4$ 则分别为对632.8 nm和800 nm波长 $45^\circ R:T$ 为1:1的半反半透镜； $1/2$ 波片、 $1/4$ 波片及检偏镜仅有He-Ne激光通过，飞秒激光不通过； $T_1 \sim T_5$ 为全铝反射镜组及反射镜，其中 $T_4$ 仅反射飞秒激光。

He-Ne激光由 $S_1$ 与飞秒激光平行进入系统。后经迈克耳孙干涉仪的两臂，由 $T_5$ 输出系统，途中经过了 $1/2$ 波片、 $1/4$ 波片及检偏镜；飞秒激光则在

$S_4$ 分束进行光谱监测，并由 $T_3$ 反射进入干涉系统，由 $T_4$ 输出。光探头PD1、PD2分别对应前面所述探头PD1、PD2，接入除法器对He-Ne激光进行探测，信号经PID处理后反馈至执行模块，实现He-Ne激光相位锁定，从而也实现了飞秒激光脉冲的相位锁定。光探头PD3对飞秒激光自相关进行探测，探测值输入计算机显示。

用上述系统对飞秒激光脉冲一阶自相关曲线进行测量，得到的结果如图5(a)所示。对于没有施加PID控制的一阶自相关谱则如图5(b)所示。

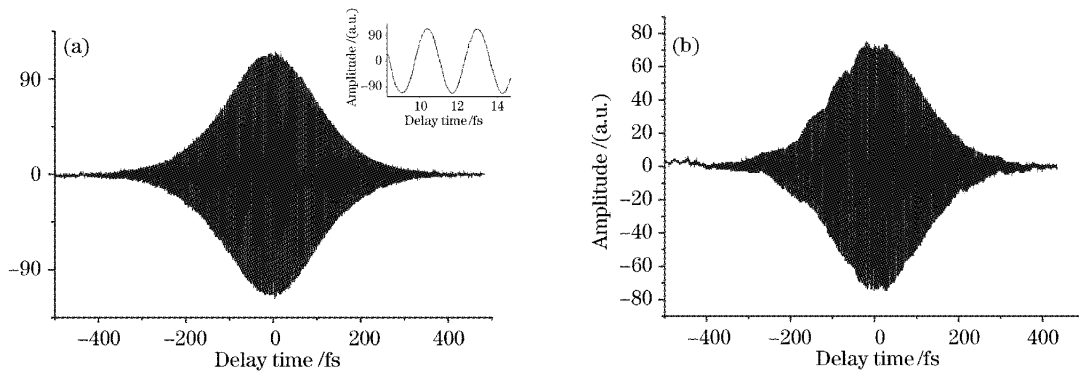


图5 飞秒脉冲自相关控制效果图。(a)加控制时的一阶自相关谱图(右上角插图为放大的条纹结构)  
(b)相同状况下不加控制时的一阶自相关谱图

Fig. 5 Effect of fs laser pulse autocorrelation controlling. The first order autocorrelation spectrum with control, the insert shows the elaborate structure around peak position (a), without control (b)

比较两图可以明显看到系统相位控制的效果是比较理想的。为方便考察图像的细致结构，分别对上两图作傅里叶变换，得到曲线如图6所示。

图6表明，系统对于飞秒激光脉冲对的相对相

位差控制效果明显，且系统已经能够达到从实验上控制飞秒激光脉冲对相对相位差的要求。这一可实现两光束相对相位精确控制的光机电一体化技术在相干光谱分析、相干控制以及傅里叶变换光谱仪等研究中具有应用价值。

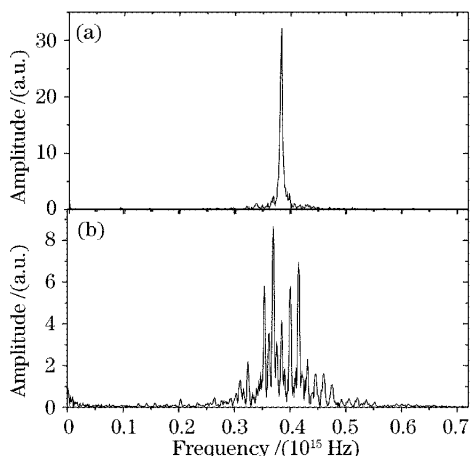


图6 傅里叶变换图。(a)对应加控制时自相关图像的傅里叶变换图，(b)对应相同环境不加控制时的状况

Fig. 6 Autocorrelation images of the Fourier transform corresponding to the two figures of Fig. 5. With control (a), without control (b)

## 5 结 论

本文提出的系统能够实现对He-Ne激光输出的两束光的相位锁定，控制精度达到纳米量级。在此基础上将它应用于超短激光双脉冲相对相位差的超行程控制，实现了飞秒激光脉冲对的相对相位动态稳定控制。

## 参 考 文 献

- 1 Kong Fan'ao. The progress and opportunities of the quantum coherent controlling of chemical reactions[J]. *Chin. J. Chemical Physics*, 2002, **15**(3): 166~167 (in Chinese)  
孔繁敖. 量子相干控制化学反应的进展和机遇[J]. *化学物理学报*, 2002, **15**(3): 166~167
- 2 Luo Li, Zhou Jianying. Femtosecond coherent dynamics of chemical reactions and laser coherent control — the 1999 Nobel Prize in Chemistry[J]. *Physics*, 2000, **29**(3): 141~144 (in Chinese)  
罗莉, 周建英. 化学反应飞秒相干动力学与激光相干控制——

- 1999年诺贝尔化学奖介绍[J]. 物理, 2000, **29**(3): 141~144
- 3 Q. Luo, D. C. Dai, G. Q. Wang *et al.*. Theory and experiment of coherent wave packet dynamics in rare earth solids: Absorption spectrum vs femtosecond fringe-resolve interferogram [J]. *J. Chem. Phys.*, 2001, **114**(4): 1870~1875
- 4 Wang Ganquan, Dai Dechang, Luo Qi *et al.*. Electron-phonon coupling via non-Markovian process in Nd:YAG[J]. *Chin. J. Chemical Physics*, 2005, **18**(3): 303~307 (in Chinese)  
王干全,戴德昌,罗琦等. Nd:YAG中电声耦合非Markovian过程的激发光谱[J]. 化学物理学报, 2005, **18**(3): 303~307
- 5 Zhu Jian, Li Juntao, Li Ming *et al.*. Fourier transform spectroscopy using light emitting diode as the optical source[J]. *Scientiarum Naturalium Universitatis Sun Yat-Sen*, 2004, **43**(5): 28~30 (in Chinese)  
朱健,李俊韬,李明等. 基于LED的投射型傅里叶变换光谱仪的研究[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2004, **43**(5): 28~30
- 6 Wang Jianlin, Hu Xiaotang. The current research of nanopositioning technology[J]. *Machine Design and Research*, 2000, **1**: 43~45 (in Chinese)  
王建林,胡小唐. 纳米定位技术研究现状[J]. 机械设计与研究, 2000, **1**: 43~45
- 7 Lin Dejiao, Wu Jian, Yin Chunyong. Super-precision positioning stage with nanometer resolution[J]. *Optical Technique*, 2001, **27**(6): 556~557 (in Chinese)  
林德教,吴健,殷纯永. 具有纳米级分辨率的超精密定位工作台[J]. 光学技术, 2001, **27**(6): 556~557
- 8 Cui Yuguo, Sun Baoyuan, Dong Weijie *et al.*. Review of research on control methods of piezoceramic —— Micropositioner in nanopositioning process [J]. *China Mechanical Engineering*, 2003, **14**(2): 164~168 (in Chinese)  
崔玉国,孙宝元,董维杰等. 基于纳米定位的压电陶瓷执行器控制方法的研究进展[J]. 中国机械工程, 2003, **14**(2): 164~168
- 9 M. U. Wehner, M. H. Ulm, M. Megener. Scanning interferometer stabilized by use of Pancharatnam's phase[J]. *Opt. Lett.*, 1997, **22**(19): 1455~1447



(上接封四)

3.7 参考文献 参考文献应是公开出版物,以便审者、编者、读者查证。文后参考文献以GB/T 7714—1987顺序编码制列出,每条内容应包括:作者(或译者,论文集编者,多于3人者用等或 *et al.*),文题,期刊名(或书名,会议名),出版年、卷、期(书或会议文集应相应列出版次、出版地、出版者、出版年、会议地点时间),起止页码。专利需列出专利性质及专利号。引用的网上出版物必须是固定的、可一直查阅的文献。中文参考文献应分别用中英文写出所有项目,并都须加上参考文献类型的标识:

参考文献类型	期刊	专著	论文集	学位论文	标准	专利	报告	报纸
文献类型标识	J	M	C	D	S	P	R	B

具体格式实例如下:

(1) 期刊:

Zhang Juan, Liu Liren, Zhou Yu *et al.*. Design of a new type interleaver[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(12): 1424~1428 (in Chinese)  
张娟,刘立人,周煜等. 一种新型的光交错复用器的设计[J]. 光学学报, 2003, **23**(12): 1424~1428

(2) 专著:

Jin Guofan, Li Jingzhen. *Laser Metrology*[M]. Beijing: Science Press, 1998, 162~165 (in Chinese)  
金国藩,李景镇. 激光测量学[M]. 北京:科学出版社, 1998, 162~165

(3) 译著:

Born M, Wolf E. *Principles of Optics*[M]. Yang Jiasun Transl. Beijing: Science Press, 1978, 182~190 (in Chinese)  
玻恩,沃尔夫. 光学原理[M]. 杨葭孙译. 北京:科学出版社, 1978, 182~190

(4) 学位论文:

Zhang Jing. *LD Sensor for Weak Vibration Measurement and its Application in Muscle Vibration Measurement* [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2000, 21~30 (in Chinese)  
张景. 激光二极管微振动传感器及其在肌肉颤动测量中的应用[D]. 武汉:华中科技大学, 2000, 21~30

(5) 技术标准:

National Standardization Technical Committee. GB 3100~3102-93. *Quantities and Units* GB3100~3102-93[S]. Beijing: China Standard Press, 1994

国家标准化技术委员会. 量和单位 GB3100~3102-93[S]. 北京:中国标准出版社, 1994

为了避免漏引,并扩大您的论文及《光学学报》、《中国激光》、《Chinese Optics Letters》等中国光学类期刊的国际、国内影响,希望增引您自己和同行近二年在《光学学报》、《中国激光》、《Chinese Optics Letters》等中国光学类期刊上发表的文章作为参考文献。

3.8 基金项目: 所投文章项目受到资助的,应标明资助名称及批准号。

作者简介: 姓名(出生年~),性别,民族(汉族可省),籍贯,职称,学历,从事专业。E-mail(少于60字)

3.9 投寄要求 为了加速期刊的电子化、网络化,加快稿件处理速度,一律采用E-mail投稿。稿件需附一份显示来稿创新点的说明(附在文章后,100~300字);请不要交寄个人,以免延误稿件的受理时间。本刊收到稿件后在2~3个工作日内E-mail发出收稿通知告知其他事项。稿件录用后,须请提供文章修改定稿后的电子版(包括图)。

3.10 本刊现已进入《中国学术期刊(光盘版)》、《中国期刊网》、《中国光学期刊网》等,不再另行通知作者,对版权有特殊要求者,请事先声明。

4 审稿程序 稿件收到评审费后分送两位同行评议、主编终审、择优录用;编辑部自收稿日起4个月内将初审意见函告作者,逾期,作者可另行处理原稿,但需告知编辑部。

5 版权转让 在审稿通过后,作者须转让著作权人作品版权(包括各种介质、媒体的版权)给编辑部,并把全部作者签名附单位盖章的版权转让函。

6 录用与否 录用稿作者应遵照中国科协有关文件精神,支付适量版面费以聊补期刊的高额亏损。由于近年来来稿量猛增,为了缩短发表周期,请作者精炼文章内容,更不要加附录,否则,超过4页的文章将加收版面费。编辑部有权对录用稿件作编辑意义的增删加工。录用稿一经本刊刊登,本刊享有版权,并向作者酌付稿酬,寄送该期刊一册和抽印本10份。

7 投稿及回复时,请告知作者的有效联系方式 除“姓名、通讯地址、邮政编码”外,E-mail、电话(办公室及家庭或宿舍)、手机等是必不可少的。并用E-mail回复修改意见和修改稿(修改部分请划线)。最好注明通讯作者(作者单位相对稳定)。

8 请推荐3~5位同行专家(包括海外华人研究人员)作候选审稿人 (给出他们从事研究的学科和课题,通讯地址和E-mail)。