

# 基于复合干涉的光纤低相干干涉传感系统研究

李昭莹 谢 芳 马 森 刘义秦

(北京交通大学理学院物理系, 北京 100044)

**摘要** 研究一种能够进行远程及绝对测量的光纤低相干干涉传感系统。该系统包含两个光纤干涉仪, 其中一个光纤干涉仪置于被测场中感应被测量的变化, 可实现远程测量; 另一个光纤干涉仪解调被测量的值。运用波分复用技术, 使用于解调的光纤干涉仪同时工作于低相干干涉和高相干干涉状态。用低相干干涉信号决定被测量的幅值, 对被测量实现绝对测量, 并使测量量程不受波长限制; 同时, 用高相干干涉信号对被测量进行高精度的测量。系统的测量量程为 6 mm, 测量分辨率小于 1 nm, 位移实验结果的线性相关系数  $R$  为 0.99。

**关键词** 光纤光学; 光纤传感; 低相干干涉; 远程测量; 绝对测量

**中图分类号** TP212 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.0612004

## Research on an Optical-Fiber Low-Coherence Interferometric Sensing System Based on Multiplexing Interferometric Technology

Li Zhaoying Xie Fang Ma Sen Liu Yiqin

(Department of Physics, School of Science, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

**Abstract** An optical-fiber low-coherence interferometric sensing system, which is suitable for distance and absolute measurement, is presented. The system includes two optical fiber interferometers. One of the optical fiber interferometer is embedded in the measured field for sensing the measurand and absolute measurement can be realized. The measurement range is never limited by the optical wavelength. And the other optical fiber interferometer is for demodulating the measurand. Based on wavelength-division-multiplexing technology, the demodulating optical fiber interferometer works in both modes of low-coherence interferometry and high-coherence interferometry. The signal of low-coherence interferometry is for determining the amplitude of the measurand, and the signal of high-coherence interferometry is for measuring the measurand precisely. The measurement range is 6 mm and the resolution is less than 1 nm. The linear correlation coefficient of the displacement measurement is 0.99.

**Key words** fiber optics; optical fiber sensing; low-coherence interferometry; distant measurement; absolute measurement

**OCIS codes** 120.3180; 120.5050; 060.2370; 060.3735

## 1 引 言

光纤低相干干涉传感系统拥有光纤高相干干涉传感系统的所有优点<sup>[1~15]</sup>。例如, 可进行非接触测量、体积小、重量轻、抗电磁干扰、价格低廉和可高度集成等。与光纤高相干干涉传感系统相比, 光纤低相干干涉传感系统还有对光强波动不敏感、可进行远程测量以及绝对测量的优点。此外, 光纤低相干

干涉传感系统还克服了光纤高相干干涉传感系统由于受干涉信号相位模糊的影响使得测量量程仅为半波长的局限, 其测量量程不受光波波长的限制。光纤低相干干涉传感技术已经成为远程及绝对测量位移、温度、压力、应力和折射率等参量的重要技术<sup>[8]</sup>。对于光纤低相干干涉传感系统, 低相干干涉图形峰值点位置的变化量与被测物理量的变化量成正比,

收稿日期: 2011-12-28; 收到修改稿日期: 2012-02-17

基金项目: 国家自然科学基金(50975022)资助课题。

作者简介: 李昭莹(1988—), 女, 硕士研究生, 主要从事光纤传感方面的研究。E-mail: 10121917@bjtu.edu.cn

导师简介: 谢 芳(1966—), 女, 教授, 博士生导师, 主要从事精密测试、光纤传感和精密仪器方面的研究。

E-mail: fxie@bjtu.edu.cn(通信联系人, 中国光学学会会员号: S040111130S)

测量出低相干干涉图形峰值点位置的变化量,即可测量出被测量的变化量。准确确定低相干干涉图形峰值点的位置以及高精度地测量此峰值点位置的变化量非常重要。文献[8]中用调节解调干涉仪光程的压电陶瓷的驱动电压值作为低相干干涉图形峰值点位置的变化量,压电陶瓷的磁滞性与非线性性将降低测量结果的精度。

本文研究了一种新的光纤低相干干涉传感系统。本传感系统包含两个光纤干涉仪,一个光纤干涉仪置于被测场中用于感应被测量,实现远程测量;另一个光纤干涉仪用于解调被测量的值。运用波分复用技术,利用光纤光栅作为反射镜,使用于解调的光纤干涉仪同时工作于低相干干涉和高相干干涉状态。利用低相干干涉信号决定被测量的幅值,对被测量实现绝对测量,并且使测量量程不受光波波长的限制;利用高相干干涉信号测量被测量的值,对被测量实现高精度测量。

## 2 光纤低相干干涉传感系统原理

如图 1 所示,此光纤传感系统包含两个光纤干涉仪,其中传感光纤干涉仪置于被测场感应被测物理量,解调光纤干涉仪用于解调被测物理量的值。利用光纤光栅(FBG)作为反射镜,使得系统中的解

调光纤干涉仪同时工作于低相干干涉和高相干干涉状态。系统中的两支光纤光栅(FBG1 和 FBG2)的布拉格波长均为 1558.00 nm,3 dB 带宽为 0.2 nm。用一个宽带 C 波段的自发辐射光源(ASE)作为光源,ASE 发光功率为 200 mW,谱宽为 35.8 nm。此光经过一个光纤隔离器和 3 dB 耦合器 1 后到达 FBG1。1558.00 nm 波长的光被 FBG1 反射,其余波长的光透过 FBG1 到达 3 dB 耦合器 2 后被分成两路。这两路光分别由光纤准直镜准直后,垂直入射到测量镜和参考镜上,再由测量镜和参考镜反射回系统并在 3 dB 耦合器 2 会合。此合光透过 FBG1、经过 3 dB 耦合器 1 和 3 dB 耦合器 3,然后又分成两路。这两路合光分别被光纤准直镜准直后分别垂直入射到两个反射镜上,再由这两个反射镜反射回系统。两路被反射回来的光在 3dB-耦合器 3 再一次会合,此合光经过环形器后,透过光 FBG2 由探测器(PD1)探测。光源发出的光谱宽为 35.8 nm,因此 PD1 探测到的合光不一定发生干涉,此合光的电矢量可表示为<sup>[8]</sup>

$$E = E_{11} + E_{12} + E_{21} + E_{22}, \quad (1)$$

式中  $E_{ij}$  是经过传感光纤干涉仪的第  $j$  个干涉臂和解调光纤干涉仪的第  $i$  个干涉臂的电矢量。其模可

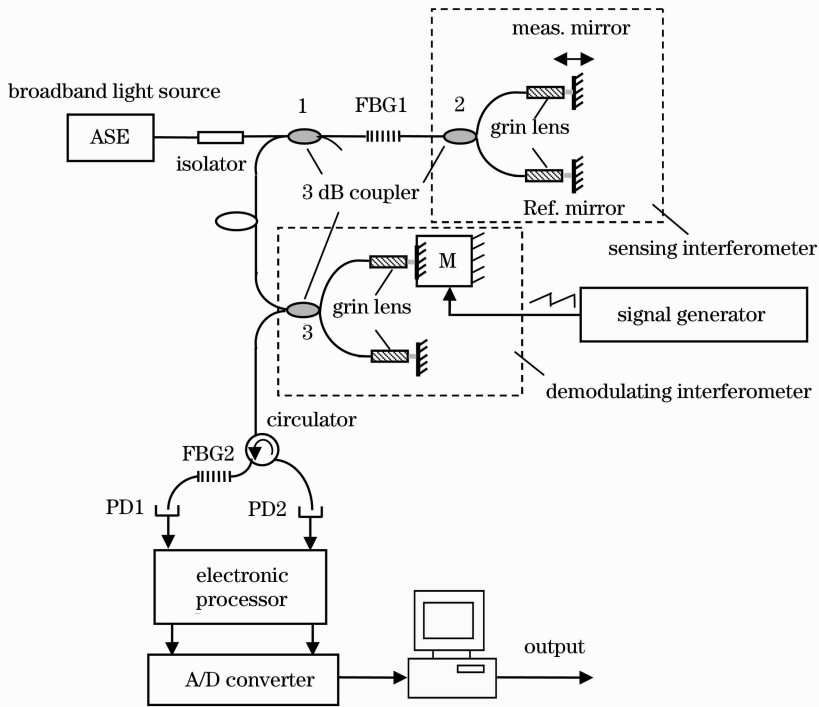


图 1 光纤传感系统原理图

Fig. 1 Principle of the optical fiber sensing system

以分别表示为

$$\begin{cases} |\mathbf{E}_{11}| = A_{11} \exp(i\phi), \\ |\mathbf{E}_{12}| = A_{12} \exp[i(\phi + k_1 x_1)], \\ |\mathbf{E}_{21}| = A_{21} \exp[i(\phi + k_1 x_2)], \\ |\mathbf{E}_{22}| = A_{22} \exp\{i[\phi + k_1(x_1 + x_2)]\}, \end{cases} \quad (2)$$

式中  $A_{ij}$  是电矢量  $\mathbf{E}_{ij}$  幅值;  $k_1$  为  $\mathbf{E}_{ij}$  的波数;  $\phi$  为  $\mathbf{E}_{11}$

的相位;  $x_1$  和  $x_2$  分别为传感光纤干涉仪和解调光纤干涉仪的光程差。光强  $I_1$  可表示为

$$I_1 = I_{10} \langle (E_{11} + E_{12} + E_{21} + E_{22}) \times (E_{11} + E_{12} + E_{21} + E_{22})^* \rangle. \quad (3)$$

展开(3)式,  $I_1$  又可表示为

$$I_1 = I_{10} \{1 + I_{11} |\nu(x_1)| \cos(k_1 x_1) + I_{12} |\nu(x_2)| \cos(k_1 x_2) + I_{13} |\nu(x_1 + x_2)| \cos[k_1(x_1 + x_2)] + I_{14} |\nu(x_1 - x_2)| \cos[k_1(x_1 - x_2)]\}, \quad (4)$$

式中  $I_{10}$  是直流分量,  $I_{1i}$  ( $i = 1, 2, 3, 4$ ) 是(4)式中每一项的标准化幅值,  $\nu(x)$  为每一项自相关函数值。当  $x_1, x_2 \gg L_c$  ( $L_c$  为光源的相干长度) 及  $x_1 - x_2 < L_c$  时(此条件为光纤低相干干涉传感系统的工作条件), (4)式中第二项、第三项、第四项为零。此时, (4)式可表示为

$$I_1 = I_{10} \{1 + I_{14} |\nu(x_1 - x_2)| \cos[k_1(x_1 - x_2)]\}. \quad (5)$$

对一个低相干光源, 自相关函数有高斯函数的形式, (5)式可表示为

$$I_1 = I_{10} \{1 + 2k_1 k_2 \exp[-(2\Delta x/L_c)^2] \cos(k\Delta x)\}, \quad (6)$$

式中  $\Delta x = x_1 - x_2$ ,  $k_1$  和  $k_2$  分别是传感光纤干涉仪和解调光纤干涉仪的分光比。对于本传感系统,  $k_1 = k_2 = 0.5$ , 所以(6)式可简化为

$$I_1 = I_{10} \left\{1 + \frac{1}{2} \exp[-(2\Delta x/L_c)^2] \cos(k\Delta x)\right\}. \quad (7)$$

从(7)式可知,  $\Delta x$  的变化可同时引起干涉条纹可见度及干涉信号相位变化。当  $\Delta x = x_1 - x_2 = 0$  时,  $I_1$  将取最大值。当被测物理量变化时, 此峰值点的位置将成比例地移动, 且移动量与由于被测量变化引起的传感光纤干涉仪的光程差成正比。光纤低相干干涉传感系统的关键就是要高精度地测出低相干干涉信号峰值点的移动量, 其也是光纤低相干干涉传感的基本原理。

本文研究利用高相干干涉仪对低相干干涉信号峰值点的移动量进行高精度测量。图 1 中的 FBG1 将中心波长为 1558.00 nm, 3 dB 带宽为 0.2 nm 的光波反射, 被反射的光波经过 3 dB 耦合器 3 后被分成两路。这两路光分别被光纤准直镜准直后, 垂直入射到两面反射镜上, 并分别反射回传感系统, 在 3 dB 耦合器 3 处再次相遇发生干涉。此干涉信号经过环形器后到达 FBG2, 由 FBG2 反射, 再次经过环

形器后, 由 PD2 探测。此干涉信号可表示为

$$I_2 = I_{20} [1 + I'_{20} \cos(k_2 x_2)], \quad (8)$$

式中  $I_{20}$  为直流分量,  $I'_{20}$  为干涉条纹的可见度,  $k_2$  为光波的波数,  $x_2$  为解调光纤干涉仪的光程差。

从(8)式可知当线性调节解调光纤干涉仪的光程差时, PD2 探测到的高相干干涉信号将呈余弦规律变化, 只要测出在低相干干涉图样峰值点的移动范围内 PD2 探测到的高相干干涉信号的条纹数, 即可测出低相干干涉图样峰值点的移动量。被测量的值与 PD2 探测到的高相干干涉信号的条纹数满足

$$\Delta d = \frac{1558}{2} n, \quad (9)$$

式中  $\Delta d$  为低相干干涉图样峰值点的移动量,  $n$  为高相干干涉信号的干涉条纹数。

将 PD1 和 PD2 的信号同时输入信号处理电路进行处理, 再同时经过 A/D 转换卡作数-模转换, 由计算机程序作数据处理, 得出在 PD1 的信号峰值点的移动范围内 PD2 的信号干涉条纹数  $n$ , 再根据(9)式得出  $\Delta d$ 。

### 3 实验及实验结果

本文以测量位移为例进行实验, 其他可以转化成位移的参量均可用本系统进行测量。为减小环境干扰对干涉测量的影响, 尽量减小两个干涉仪中各个干涉臂的长度。在实验中, 传感光纤干涉仪和解调干涉仪的干涉臂的光纤长度均为 10 mm 左右, 如图 2 所示。两个光纤干涉仪的各个干涉臂中的准直镜与反射镜的距离均为 1 mm。所用探测器的响应度为 0.99 A/W, 暗电流小于 1 nA。当系统中的各个反射镜均处于静止状态时, PD1 和 PD2 探测到的信号如图 3 所示, 曲线 1 (curve 1) 是 PD1 探测到的信号, 曲线 2 (curve 2) 是 PD2 探测到的信号, 均保持恒定值, 由此可知外界干扰对干涉仪的影响得到有效抑制。当测量镜位移  $\Delta d$  时, 锯齿波电压驱动

一维平移台 M 线性调节解调光纤干涉仪的光程差,在锯齿波电压的一个周期内,PD1 和 PD2 探测到的信号变化规律分别为

$$I_1 = I_{10} \left\{ 1 + \frac{1}{2} \exp\{-[2(\Delta x - \Delta d + vt)/L_c]^2\} \times \cos[k(\Delta x - \Delta d + vt)] \right\}, \quad (10)$$

$$I_2 = I_{20} \{ 1 + I'_{20} \cos[k_2(x_2 - vt)] \}, \quad (11)$$

式中  $v$  为调节光程差的速度,  $t$  为调节光程差的时间。

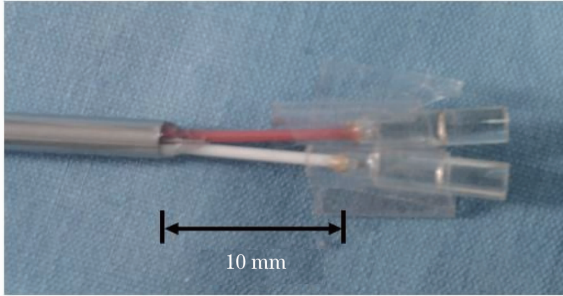


图 2 带自准直镜的光纤干涉臂

Fig. 2 Interferometric arms with grin lens

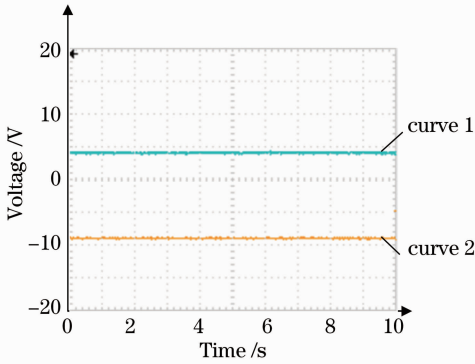


图 3 反射镜均处于静止状态时 PD1 和 PD2 探测到的信号

Fig. 3 Signals detected by PD1 and PD2 when the mirrors are in static state

图 4 是在锯齿波电压的一个周期内,PD1 和 PD2 探测到的信号。曲线 1(curve 1)是 PD1 探测到的低相干干涉信号,曲线 2(curve 2)是 PD2 探测到的高相干干涉信号。当测量镜的位移变化时,PD1 探测到的低相干干涉图样峰值点的位置将成比例地移动。经过计算机程序处理,测出 PD1 探测到的低相干干涉图样峰值点的位置的移动范围内 PD2 探测到的高相干干涉信号的条纹数,即可根据(9)式计算出位移  $\Delta d$ 。

本系统中所用 A/D 卡为 16 位,该 A/D 卡的输入电压幅值为 10 V,A/D 卡的电压分辨率为  $10 \text{ V}/2^{16} =$

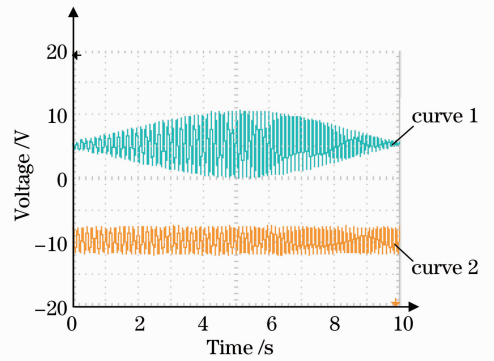


图 4 在一个调制周期内 PD1 和 PD2 探测到的信号

Fig. 4 Signals detected by PD1 and PD2 during a modulating period

0.15 mV。由图 4 可知,高相干干涉信号的峰-峰值为 4 V,可计算本系统的分辨率为  $\frac{0.15 \text{ mV}}{4000 \text{ mV}} \times \frac{1558 \text{ nm}}{4} = 0.015 \text{ nm}$ 。由于信号处理电路的噪声的影响,当反射镜均处于静止状态时 PD2 的输出信号以幅值约 30 mV 无规律地变化,高相干干涉信号变化 30 mV 对应的位移为  $\frac{1558 \text{ nm}}{4} \times \frac{30 \text{ mV}}{4000 \text{ mV}} = 2.921 \text{ nm}$ 。综合 A/D 卡有限的分辨率以及信号处理电路的噪声引起的测量误差,可计算本测量系统的测量不确定度为 1.461 nm。

由于利用解调光纤干涉仪产生的高相干干涉信号作为测量的标尺,所以必须有高相干干涉信号存在。本传感系统的测量量程由系统中所用的光纤光栅的布拉格波长的相干长度决定。所用的光纤光栅的布拉格波长为 1558.00 nm,3 dB 带宽为 0.2 nm,该光纤光栅反射的光波的相干长度为 12136820 nm,本系统的测量量程为该相干长度的 1/2,即 6 mm。

在做位移实验过程中,利用另一个一维平移台等间距地移动测量镜,每移动 10  $\mu\text{m}$  测一次,移动范围为 200  $\mu\text{m}$ 。实验结果如图 5 所示。对实验所得数据做最小二乘拟合,可知实验数据的线性相关系数  $R$  为

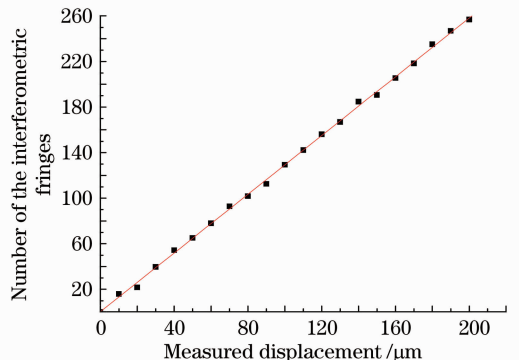


图 5 位移测量结果

Fig. 5 Measurement results of displacement

0.99,说明此测量系统有很好的线性特征。

## 4 结 论

研究了一种适合于远程及绝对测量的高精度光纤低相干涉传感系统,利用光纤光栅作为反射镜,使测量系统中的解调光纤干涉仪同时工作在低相干涉和高相干涉状态。用低相干涉信号决定被测量的幅值,实现对被测量的绝对测量,并使得测量量程不再受光波波长的限制;用高相干涉信号作为测量标尺,对被测量的值进行高精度的测量。系统的位移测量量程为 6 mm,测量分辨率小于 1 nm,位移实验结果的线性相关系数  $R$  为 0.99。

## 参 考 文 献

- 1 D. P. Hand, T. A. Carolan, J. S. Barton *et al.*. Profile measurement of optically rough surfaces by fiber-optic interferometry [J]. *Opt. Lett.*, 1993, **18**(16): 1361~1363
- 2 G. Beheim, K. Fritsch, R. N. Poorman. Fibre-linked interferometric pressure sensor [J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 1987, **58**(9): 1655~1659
- 3 B. T. Meggitt, C. J. Hall, K. Weir. An all fibre white light interferometric strain measurement system [J]. *Sensors Actuators A*, 2000, **79**(1): 1~7
- 4 Eric Udd. An overview of fiber-optic sensors [J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 1995, **66**(8): 4015~4030
- 5 D. A. Jackson, A. Dandridge, S. K. Sheem. Measurements of small phase shifts using a single-mode optical fiber interferometer [J]. *Opt. Lett.*, 1980, **5**(4): 139~141
- 6 Mingzheng Jiang, Edmund Gerhard. A simple strain sensor using a thin film as a low-finesse fiber-optic Fabry-Perot interferometer [J]. *Sensors and Actuators A*, 2001, **88**(1): 41~46
- 7 Dejiao Lin, Xiangqian Jiang, Fang Xie. High stability multiplexed fiber interferometer and its application on absolute displacement measurement and on-line surface metrology [J]. *Opt. Express*, 2004, **12**(23): 5729~5734
- 8 Yunjiang Rao, David A. Jackson. Recent progress in fibre optic low-coherent interferometry [J]. *Meas. Sci. Technol.*, 1996, **7**(7): 981~999
- 9 X. M. Zhang, Yuxiang Liu, H. Bae *et al.*. Phase modulation with micromachined resonant mirrors for low-coherence fiber-tip pressure sensors [J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(26): 23965~23974
- 10 Lazo M. Manojlovic. A novel common path interferometric technique for vibration measurement based on two-fiber-optic couplers [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2011, **11**(7): 1541~1547
- 11 Guo Dongmei, Tan Suqing, Wang Ming. Analysis of micro-displacement measurement accuracy in self-mixing interferometer based on sinusoidal phase modulating technique [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(6): 845~850
- 郭冬梅, 谈苏庆, 王 鸣. 正弦相位调制自混合干涉微位移测量精度分析 [J]. *光学学报*, 2006, **26**(6): 845~850
- 12 Yu Yanguang, Guo Changying, Ye Huiying. Vibration measurement based on moderate optical feedback self-mixing interference [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(8): 1430~1434
- 禹延光, 郭常盈, 叶会英. 基于适度光反馈自混合干涉技术的振动测量 [J]. *光学学报*, 2007, **27**(8): 1430~1434
- 13 Liang Jing, Long Xingwu, Zhang Bin *et al.*. Absolute distance measurement by using 117  $\mu\text{m}$  synthetic wavelength [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(10): 2947~2951
- 梁 晶, 龙兴武, 张 斌等. 用 117  $\mu\text{m}$  合成波长实现绝对距离干涉测量 [J]. *光学学报*, 2010, **30**(10): 2947~2951
- 14 Wang Jun, Chen Lei, Wu Quanying *et al.*. Retardation measurement of wave plates using white-light Michelson interferometer [J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(5): 0508001
- 王 军, 陈 磊, 吴泉英等. 一种基于白光迈克耳孙干涉仪波片延迟量的测量方法 [J]. *中国激光*, 2011, **38**(5): 0508001
- 15 Li Min, Xie Fang, Chen Zhimin. Vibration measurement system based on a highly stabilized fiber  $3 \times 3$  coupler interferometer [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(2): 549~553
- 李 敏, 谢 芳, 陈志敏. 高稳定的光纤  $3 \times 3$  耦合器干涉振动测量系统 [J]. *中国激光*, 2010, **37**(2): 549~553

栏目编辑: 何卓铭