

随机信号相关法测量多模光纤差分模延迟

阒 杰 王安帮 徐 航 张建国 王云才

(太原理工大学物理与光电工程学院, 光电工程研究所, 新型传感器与智能控制教育部重点实验室, 山西 太原 030024)

摘要 提出了一种基于宽带随机信号测量多模光纤差分模延迟的方法。该方法将放大自发辐射(ASE)光信号分成两路,分别作为参考光与探测光,参考光与经过多模光纤传输后的探测光进行互相关,根据相关曲线峰值的位置可成功测量多模光纤差分模延迟。实验测量了不同长度多模光纤的差分模延迟,并分析了测量信噪比。结果表明,该方法在限模注入下测得待测光纤的差分模延迟系数为 0.61 ps/m,具有较高的测量信噪比,当相关曲线峰值旁瓣水平为 3.16 dB 时,信号强度仅为噪声强度的 5.3%。

关键词 光纤光学; 时延测量; 相关法; 差分模延迟

中图分类号 TN929.11 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.0705001

Differential Mode Delay Measurement for Multimode Fibers Using Random Signal Correlation Technique

Kan Jie Wang Anbang Xu Hang Zhang Jianguo Wang Yuncai

(Key Laboratory of Advanced Transducers and Intelligent Control System, Ministry of Education, Institute of Optoelectronic Engineering, College of Physics and Optoelectronics, Taiyuan University of Technology, Taiyuan, Shanxi 030024, China)

Abstract An approach to measure differential mode delay of multimode fibers based on broadband random signal is proposed. An amplified spontaneous emission (ASE) signal is divided into two beams, with one serving as the probe light and the other as the reference light. By correlating the reference light and the probe light transmitted through the multimode fiber, the differential mode delay is obtained by the correlation peaks. Differential mode delay for multimode fibers with different lengths is experimentally measured, and the signal-to-noise ratio of measurement is analyzed. Results show that the differential mode delay coefficient is 0.61 ps/m for the restricted mode launch condition. When the peak sidelobe level is 3.16 dB, the probe signal intensity is only 5.3% of the noise intensity.

Key words fiber optics; delay measurement; correlation; differential mode delay

OCIS codes 060.2310; 060.2300; 060.2400

1 引 言

多模光纤(MMF)以其布线和维护成本低的优势,被广泛应用于局域网、存储网等^[1-2]。随着传输数据量的迅猛增加,多模光纤需要提供更高的传输带宽。模式色散是多模光纤中的主要色散,会导致传播光信号的展宽和分裂,限制了多模光纤的传输

距离和传输带宽。多模光纤差分模延迟(DMD)是多模光纤被激发的模式中最快模式与最慢模式之间的时延差,通过 DMD 的测量可以确定多模光纤的传输带宽^[3-8]。

目前测量 DMD 的技术主要有脉冲时域法^[9]、频域法^[10-11]和低相干干涉法^[12]。脉冲时域法由于

收稿日期: 2013-02-01; **收到修改稿日期**: 2013-03-09

基金项目: 国家自然科学基金(60908014)、山西省科技攻关项目(20100321055-02)、国家自然科学基金科学仪器专项(60927007)、山西省回国留学人员重点科研项目

作者简介: 阒 杰(1988—),男,硕士研究生,主要从事随机信号对多模光纤特性检测方面的研究。

E-mail: ytkj13@126.com

导师简介: 王云才(1965—),男,教授,博士生导师,主要从事半导体激光器的非线性动力学特性及其应用等方面的研究。

E-mail: wangyc@tyut.edu.cn(通信联系人)

结构、原理简单,成为主要的测量技术。其测量原理是:光脉冲发射至待测多模光纤,利用快速探测系统测量脉冲传输后的展宽或者分裂,从而计算出DMD;其测量分辨率由光脉冲宽度决定。局域网中短距离多模光纤的模间延迟量小,故对这种情况的测量需要非常窄的光脉冲,测量脉宽一般为几十皮秒。增益开关半导体激光器是产生脉宽小于100 ps光脉冲的简单方法,只需要对激光器直接调制即可产生窄脉冲。但是由于激光器的自发辐射噪声的影响,其脉冲抖动较大,通常为1.7~14 ps^[13],严重影响测量结果。若要获得低抖动光脉冲,需要辅以光注入^[13-14]等方法来抑制抖动,或者采用高速外调制^[15]、锁模脉冲激光器^[16-18]等其他技术,使得结构复杂化,成本变高。并且光脉冲携带能量低,致使测量的信噪比(SNR, R_{SN})低。

频域法和低相干干涉法虽可提高测量信噪比和测量精度,但也存在一些不足:频域法的工作原理与光频域反射仪类似,不仅需要昂贵的可调谐激光器,而且需要干涉仪来抑制扫频光源的噪声,结构复杂;低相干干涉法利用一个宽带的放大自发辐射(ASE)光源,通过扰模器获得模间干涉信号,通过光谱仪测出不同差频信号对应的光谱,进而转换成时域的模间延迟,这就导致其测量范围受限于参考光程的扫描范围,且不能像时域法一样判断单个模式群的时间延迟信息。

本课题组前期研究发现^[19-25],利用宽带的、波形随机起伏的信号可以实现高精度的光纤故障位置测量。基于这种技术,本文提出了一种检测多模光

纤DMD的方法:利用ASE光源代替传统脉冲时域法中昂贵的低抖动窄脉冲发射装置,采用相关法对信号进行处理,可实现对多模光纤不同模式的时延测量,具有高的测量信噪比。

2 实验装置及原理

实验装置如图1所示,虚线框中为ASE光源。将半导体激光器产生的波长为980 nm的抽运光通过波分复用器(WDM)耦合到掺铒光纤(EDF)中,产生ASE信号。再利用光环形器(OC)和可调谐光纤布拉格光栅(TFBG)对ASE信号进行滤波,滤波后的光信号经光环形器进入掺铒光纤放大器(EDFA)。放大后的光信号通过40:60的耦合器分成两路:40%的光信号作为参考信号;60%的光信号作为探测信号,经由单模光纤(SMF)发射到多模光纤纤芯的一个偏置位置处。限模注入方式下,多模光纤中只激发了少量较低损耗的低阶模式,这种注入方式能够使激发的模式达到稳态分布,模式耦合对测量的影响可以忽略。两路光信号经相同的光电探测器(PD1、PD2)转变为电信号,最终由实时示波器(OSC)进行数据采集,并通过计算机实现参考信号与探测信号的互相关运算,进而根据互相关曲线峰值的位置测量出激发的模式在多模光纤中的延迟信息。需要说明的是由于实验缺少扫描器件,没有通过一定步长扫描多模光纤纤芯的不同偏置位置,只进行了多模光纤纤芯一个偏置位置的测量,但这足以用来验证本方法的可行性和有效性。

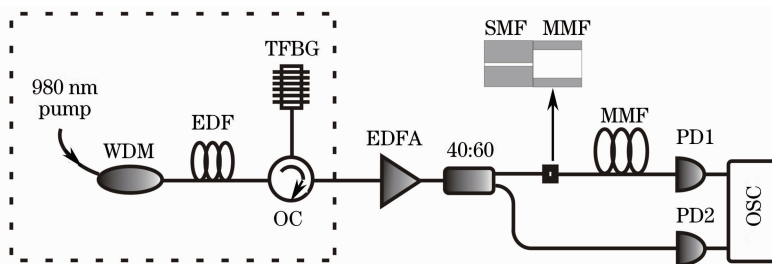


图1 ASE信号检测多模光纤差分模延迟的实验装置图

Fig. 1 Experimental setup for DMD measurement of a multimode fiber using an ASE signal

实验中所使用的半导体激光器(LUMICS)最大输出功率为250 mW,由低噪声电流源(Lightwave LDX 3545B)进行驱动。EDF的长度为8 m,光电探测器(THORLAB SSIR5-FC)的带宽为5 GHz,数字实时示波器(LeCroy SDZ-8-Zi)的带宽和最高采样率分别为6 GHz和40 GS/s。

由于滤波后ASE信号的相关曲线具有类似于

δ 函数的线形,因此可以通过参考信号与探测信号的互相关运算进行时延测量。设参考信号为 $X(t)$,探测信号为 $\sum_i^M aX(t + \tau_i)$, M 为多模光纤中传播的模式群数量, a 为探测信号占参考信号的百分比, τ_i 为不同模式的时间延迟。则互相关函数可表示为

$$X(t) \otimes \sum_i^M aX(t + \tau_i) \approx \sum_i^M ak_i \delta(\tau_i), \quad (1)$$

式中“ \otimes ”表示互相关运算， k_i 是归一化系数。(1) 式中每个模式对应的互相关曲线都具有类似 δ 函数的线形，互相关曲线峰值的位置表示每个模式的时间延迟。因此可以通过相关曲线不同峰值位置的相对时延来测量多模光纤的 DMD。

3 放大自发辐射探测信号的特性

多模光纤中的色度色散也会引起传播光脉冲的展宽，在测量 DMD 时，要降低色度色散对测量结果产生的影响。美国通信工业协会规定，色度色散对测量多模光纤差分模延迟的影响要小于 10%，且由测量波长下的色度色散系数和待测光纤长度可以算

出测试光源允许的最大光谱宽度，选取的滤波器线宽要小于测量允许的最大光谱宽度。由于 ASE 信号是一个宽谱的光源，因此对其进行滤波来降低色度色散的影响。实验选用的滤波器为可调谐光纤布拉格光栅，-3 dB 线宽为 0.25 nm，调谐范围为 1530~1570 nm。图 2(a) 中的灰线为 ASE 信号的光谱，实线为滤出 1550 nm 波段信号的光谱，谱宽为 0.25 nm。图 2(b) 为 ASE 探测信号的功率谱，受限于探测器的带宽，其 -3 dB 带宽为 11 GHz，而 ASE 信号的实际带宽更大；图 2(c) 为 ASE 探测信号的时序图，表明时序波形快速且无规则地变化，其对应的自相关曲线如图 2(d) 所示，具有类似于 δ 函数的线形，在采集带宽 5 GHz 下的半峰全宽 (FWHM, $w_{1/2}$) 为 124 ps。

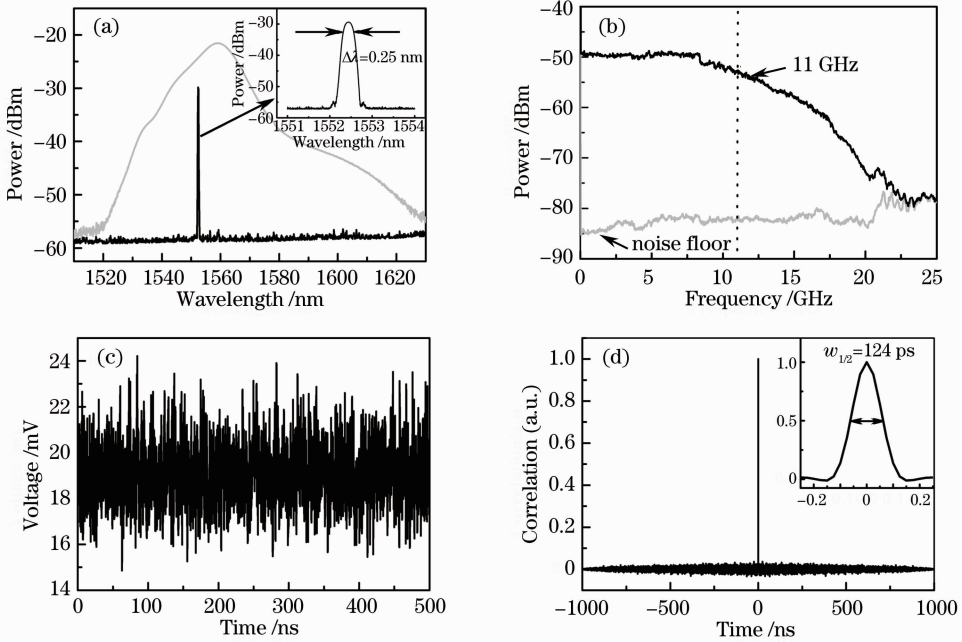


图 2 探测信号特性。(a) 光谱图；(b) 功率谱；(c) 时序图；(d) 自相关曲线

Fig. 2 Characteristics of the probe signal. (a) Optical spectra; (b) power spectra; (c) time series; (d) autocorrelation trace

4 实验结果及分析

4.1 差分模延迟测量结果

一个典型测量结果如图 3 所示，待测多模光纤长度为 1015 m。从图 3 中可知，两个峰值表明在当前的偏置限模注入下共激发了两个模式群，两个模式群的传播速度不同使两个峰值的延迟位置不同。峰值相对位置的时延差为 625 ps，相应的 DMD 系数为 0.615 ps/m。

测量的分辨率由自相关曲线的 FWHM 决定，目前受探测器带宽只有 5 GHz 的限制，测量分辨率

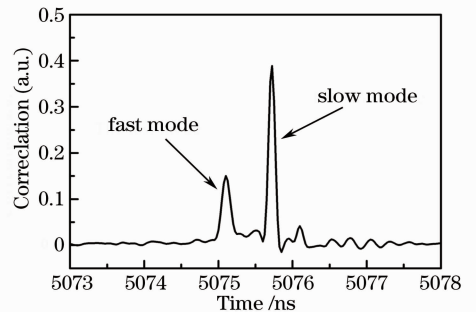


图 3 多模光纤为 1015 m 时的测量结果
Fig. 3 Measurement result of a multimode fiber with a length of 1015 m

为 124 ps。在图 4 中,虚线表示参考信号的自相关曲线,黑色实线是参考信号与探测信号互相关运算之后的结果。图 4(a)中,测量长度为 327 m,测量分辨率可以分辨出不同的模式,互相关曲线分裂成两个峰,峰值的 FWHM 为 127 ps,较自相关曲线的 FWHM 展宽较小,故色度色散对互相关曲线展宽的影响是微弱的。随着光纤长度的减小,模间延迟量减小。图 4(b)中测量长度为 209 m,测量分辨率不

能分辨出不同的模式,互相关曲线峰值展宽。这种情况下,近似认为相关曲线的展宽完全由模间延迟引起,以互相关曲线和自相关曲线 FWHM 的差值近似表示模式间的时延差,此时的时延差为 118 ps, DMD 系数为 0.564 ps/m,这时的 DMD 系数偏离图 3 中以峰值位置测量的结果 8%;当模间延迟量进一步减小时,如图 4(c)所示,测量长度为 87 m,该测量分辨率下无法测量出此时的模间延迟。

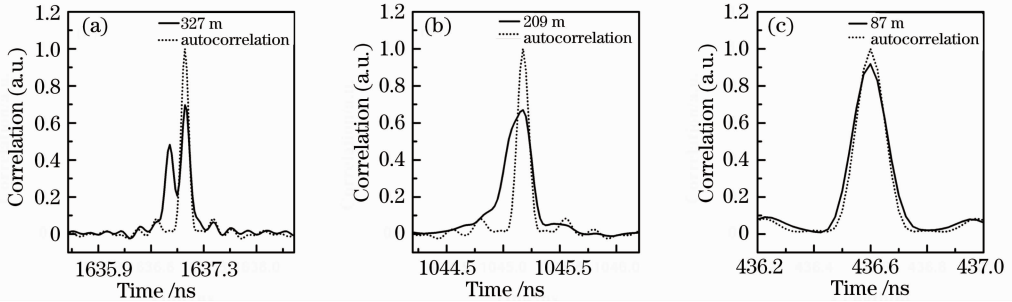


图 4 不同长度多模光纤相关运算后的结果图。(a) 327 m;(b) 209 m;(c) 87 m

Fig. 4 Cross-correlation results for MMFs with different lengths. (a) 327 m; (b) 209 m; (c) 87 m

因此,当探测分辨率可以分辨出不同的模式时,用互相关曲线峰值的不同位置表示模间延迟;当探测分辨率不足以分辨出不同的模式而导致互相关曲线峰值明显展宽时,近似以互相关曲线和自相关曲线 FWHM 的差值表示模式间的时延差。

在偏置限模注入位置不变的情况下,测量了不同长度多模光纤的 DMD。结果如图 5 所示,随着多模光纤长度的增加,DMD 线性增长。该条件下所测多模光纤的 DMD 系数为 0.61 ps/m。

条件下,用峰值旁瓣水平(PSL, P_{SL})来衡量探测能力,定义 $P_{SL}=10\lg(P_1/P_2)$,其中 P_1 表示相关曲线峰值高度, P_2 表示相关曲线噪声基底的最高峰值,用 ASE 信号与噪声信号的强度比(即信噪比)来衡量噪声信号对 ASE 信号的干扰能力。如图 6 所示,当没有噪声干扰时,PSL 为 15.79 dB;当 SNR 分别为 0 dB 和 -6.02 dB 时,PSL 分别为 14.61 dB 和 9.22 dB,仍然可以清楚地探测出 ASE 信号。随着噪声信号强度的增加,当 PSL 下降到 3.16 dB 时,SNR 为 -12.75 dB,即此时的信号强度是噪声强度的 5.3%。实验结果表明,该方法具有较高的测量信噪比。需要注意的是,为了不引入模式的干扰,这里所用的光纤为单模光纤。

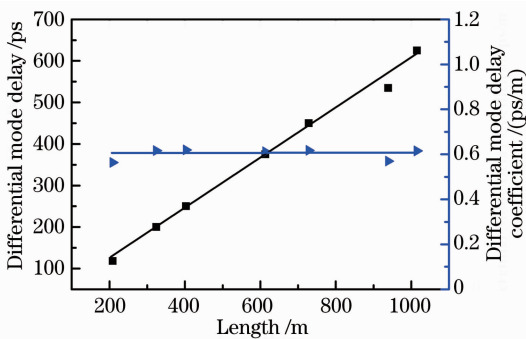


图 5 不同长度多模光纤的差分模延迟

Fig. 5 DMD for multimode fibers with different lengths

4.2 测量信噪比的分析

多模光纤的损耗较大,对长距离多模光纤及激发的能量较低的模式测量需要较高的信噪比,本文实验验证了所提出的方法具有较高的测量信噪比。具体方法为:将一路噪声信号通过耦合器耦合到探测信号中,不断改变噪声信号的强度,测量相关曲线峰值的变化。在采样长度为 5 μ s,单次测量的

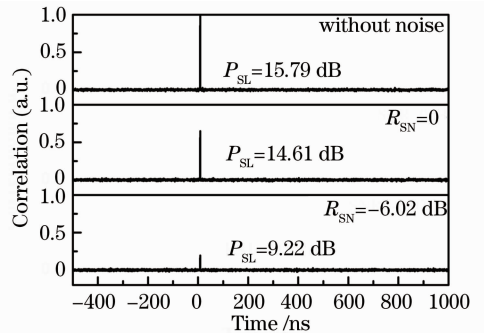


图 6 不同噪声强度下相关结果

Fig. 6 Cross-correlation results for different noise intensities

4.3 测量方法的分析

传统的脉冲时域法,根据探测脉冲峰值的 25%

位置来确定模式的时延信息,由于探测系统会对光脉冲产生振铃现象^[9],引起脉冲峰值的波动,故对峰值位置的判断存在误判。美国通信工业协会规定,脉冲时域法测量 DMD 时,探测系统振铃产生的过冲或下冲要小于参考光信号峰值的 5%。提出的方法利用的探测信号是连续光,每个传播模式对应的相关曲线只有一个峰值,探测系统引起的振铃影响就可以消除。

本文提出的方法的测量分辨率由相关曲线的 FWHM 决定,ASE 信号的自相关函数与其功率谱函数是一对傅里叶变换对,故相关曲线的 FWHM 理论上唯一取决于 ASE 信号的带宽。当前的测量分辨率受限于光电探测器的带宽,只利用了信号 5 GHz 的带宽,对应的测量分辨率为 124 ps,若要提高测量分辨率,可以采用更高带宽的探测装置,就可以实现几十皮秒的测量分辨率。在探测信号方面,还可以选择其他具有类似于 δ 函数线形的随机信号,例如混沌信号、伪随机码序列等。

该实验中的误差来源主要有两个方面:1) 色度色散引起的误差。色度色散会使传输信号的带宽降低,相关曲线 FWHM 发生展宽,引起测量误差。实验中采用窄线宽的可调谐滤波器来减小色度色散带来的影响,确保色度色散引起的误差小于 10%。2) 采样间隔引起的误差。实验使用的采样率为 40 GS/s,对应的采样间隔是 25 ps,因此测量仪器分辨率引起的最大误差为 25 ps。对于这个问题,可以在数据处理的过程中采用内插法来减小采样间隔带来的误差。

5 结 论

提出了一种利用宽带 ASE 光信号作为探测光,通过互相关运算来测量多模光纤 DMD 的方法。实验测量了不同长度多模光纤在限模注入情况下的 DMD,DMD 系数为 0.61 ps/m。实验分析表明这种方法具有较高的测量信噪比,PSL 为 3.16 dB 时,信号强度仅为噪声强度的 5.3%;同时可以消除探测系统振铃的影响。

参 考 文 献

- 1 Freund R E, Bunge C, Ledensov N N, *et al.*. High-speed transmission in multimode fibers[J]. *J Lightwave Technol.* 2010, 28(4): 569—586.
- 2 Aronson L B, Lemoff B E, Buckman L A, *et al.*. Low-cost multimode WDM for local area networks up to 10 Gb/s[J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 1998, 10(10): 1489—1491.
- 3 Raddatz L, White I H, Cunningham D G, *et al.*. Influence of

- restricted mode excitation on bandwidth of multimode fiber links[J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 1998, 10(4): 534—536.
- 4 Lieber W, Yi X S, Nontasut N, *et al.*. Differential mode delay (DMD) in graded-index multimode fiber: effect of DMD on bandwidth tuned by restricted launch conditions[J]. *Appl Phys B*, 2002, 75(4-5): 487—491.
- 5 Bunge C A, Kropp J R, Petermann K. Study of simplified test procedure for 10-GB-ethernet fibers[J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2002, 14(11): 1539—1541.
- 6 Lethien C, Loyez C, Vilcot J P, *et al.*. Differential mode delay measurements of fluorinated graded index polymer optical fiber[J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2008, 20(18): 1584—1586.
- 7 Noda T, Koike Y. Bandwidth enhancement of graded index plastic optical fiber by control of differential mode attenuation[J]. *Opt Express*, 2010, 18(3): 3128—3136.
- 8 Ishigure T, Kano M, Koike Y. Which is a more serious factor to the bandwidth of GI POF: differential mode attenuation or mode coupling? [J]. *J Lightwave Technol*, 2000, 18(7): 959—965.
- 9 Telecommunications Industry Association. TIA-455-220-A. Differential Mode Delay Measurement of Multimode Fiber in the Time Domain [S]. Arlington: Telecommunications Industry Association, 2003.
- 10 Ahn T J, Moon S, Youk Y, *et al.*. New optical frequency domain differential mode delay measurement method for a multimode optical fiber [J]. *Opt Express*, 2005, 13 (11): 4005—4011.
- 11 Ahn T J, Kim D Y. High resolution differential mode delay measurement for a multimode optical fiber using a modified optical frequency domain reflectometer[J]. *Opt Express*, 2005, 13(20): 8256—8262.
- 12 Lee J Y, Kim D Y. Determination of the differential mode delay of a multimode fiber using Fourier-domain intermodal interference analysis[J]. *Opt Express*, 2006, 14(20): 9016—9021.
- 13 Li Yuhua, Lou Caiyun, Han Ming, *et al.*. 10 GHz gain-switched DFB laser with low timing jitter[J]. *Chinese J Semiconductors*, 2001, 22(6): 792—795.
李玉华, 娄采云, 韩 明, 等. 10 GHz 低抖动增益开关 DFB 激光器[J]. *半导体学报*, 2001, 22(6): 792—795.
- 14 Wang Yuncai. Experimental study on the timing jitter of gain-switched laser diodes with photon injection[J]. *Acta Physica Sinica*, 2003, 52(9): 2190—2193.
王云才. 增益开关半导体激光器在外光注入下脉冲抖动的实验研究[J]. *物理学报*, 2003, 52(9): 2190—2193.
- 15 Yu Jianjun, Yang Bojun, Guan Kejian. The generation of 5 Gbit/s NRZ optical pulses employing a Ti LiNbO₃ amplitude modulator[J]. *Chinese J Lasers*, 1998, 25(4): 359—363.
余建军, 杨伯君, 管克俭. 利用外调制方式产生 5 Gbit/s 的非归零码光脉冲[J]. *中国激光*, 1998, 25(4): 359—363.
- 16 Liu Pengzu, Hou Jing, Zhang Bin, *et al.*. 1550 nm passively mode-locked fiber laser with a semiconductor saturable absorber mirror[J]. *Chinese J Lasers*, 2011, 38(7): 0702017.
刘鹏祖, 侯 静, 张 斌, 等. 基于半导体可饱和吸收镜的 1550 nm 被动锁模光纤激光器[J]. *中国激光*, 2011, 38(7): 0702017.
- 17 Fu Jie, Pang Qingsheng, Chang Liang, *et al.*. Research on cavity-dumping mode-locked laser of picoseconds at 10 kHz[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(3): 0314002.
付 洁, 庞庆生, 常 亮, 等. 10 kHz 腔倒空锁模皮秒激光器研究[J]. *光学学报*, 2011, 31(3): 0314002.
- 18 Liu Jiang, Xu Jia, Wang Qian, *et al.*. High-pulse-energy passively mode-locked 2.0 μm thulium-doped ultrafast all-fiber laser[J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(6): 0602009.
刘 江, 徐 佳, 王 潜, 等. 高能量全光纤结构被动锁模 2.0 μm 掺铥超短脉冲光纤激光器[J]. *中国激光*, 2012, 39(6): 0602009.

- 19 Yang Congyuan, Wang Anbang, Zhang Zhaoxia, *et al.*. Correlation optical fiber fault locator based on chaotic laser and its experimental application research[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(2): 0208002.
杨丛渊, 王安帮, 张朝霞, 等. 混沌激光相关法光纤断点定位仪及其应用的实验研究[J]. 中国激光, 2011, 38(2): 0208002.
- 20 Han Gouhua, Wang Yuncai. Faults location for transmission lines by using chaotic laser signal[J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(8): 2020—2024.
韩国华, 王云才. 基于混沌激光的传输线断点测量[J]. 中国激光, 2010, 37(8): 2020—2024.
- 21 Wang Bingjie, Qian Jianjun, Zhao Tong, *et al.*. Anti-jamming performance of chaotic lidar[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(5): 0514002.
王冰洁, 钱建军, 赵彤, 等. 混沌激光雷达的抗干扰性能分析[J]. 中国激光, 2011, 38(5): 0514002.
- 22 Zhang Mingjiang, Liu Tiegeng, Zheng Jianyu, *et al.*. Demonstration of ultrawideband chaotic signal generating utilizing external feedback laser diode [J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(4): 0405002.
张明江, 刘铁根, 郑建宇, 等. 利用光反馈半导体激光器产生超宽带混沌脉冲信号[J]. 中国激光, 2011, 38(4): 0405002
- 23 Wang Y, Wang B, Wang A. Chaotic correlation optical time domain reflectometer utilizing laser diode [J]. IEEE Photon Technol Lett, 2008, 20(19): 1636—1638.
- 24 Feng Ye, Yang Yibiao, Wang Anbang, *et al.*. Generation of 27 GHz flat broadband chaotic laser with semiconductor laser loop [J]. Acta Physica Sinica, 2011, 60(6): 064206
冯野, 杨毅彪, 王安帮, 等. 利用半导体激光器环产生 27 GHz 的平坦宽带混沌激光[J]. 物理学报, 2011, 60(6): 064206
- 25 Xu Hang, Wang Anbang, Han Xiaohong, *et al.*. Measuring breakpoints and impedance mismatch for dielectric transmission lines by using correlation method of chaotic signals [J]. Acta Physica Sinica, 2011, 60(9): 090503.
徐航, 王安帮, 韩晓红, 等. 混沌信号相关法测量电介质传输线的断点及阻抗失配[J]. 物理学报, 2011, 60(9): 090503.

栏目编辑: 王晓琰