

光时域反射-光纤光栅传感系统中双激光器的驱动设计

章鹏博 胡辽林 华灯鑫 巩鑫

(西安理工大学机械与精密仪器工程学院, 陕西 西安 710048)

摘要 为了扩大应变测量的范围,提出了使用两个分布反馈式(DFB)激光器作为光时域反射-光纤光栅(OTDR-FBG)传感系统的光源的方法,并设计了相应的纳秒脉冲驱动电路和温控电路,得到两个激光器的驱动脉冲宽度分别为 3.10 ns 和 3.18 ns,脉冲幅值分别为 4.40 V 和 4.08 V,温度控制电路精度达到 ± 0.04 °C。经测试得到的纳秒脉冲和温控精度满足 OTDR-FBG 传感系统的要求。

关键词 光栅;光时域反射;双分布反馈式激光器;纳秒脉冲驱动电路;温控电路

中图分类号 TN86;TN248.4 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.0405002

Design of Dual Lasers Driving Circuits in Optical Time Domain Reflectometry-Fiber Bragg Grating Sensing System

Zhang Pengbo Hu Liaolin Hua Dengxin Gong Xin

(School of Mechanical and Precision Instrument Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China)

Abstract To expand the range of strain measurement, a new method is proposed by using two distributed feedback (DFB) lasers as light source of optical time domain reflectometry-fiber Bragg grating (OTDR-FBG) sensing system. The corresponding nanosecond pulse driving circuits and the temperature control circuits are also designed. The driving pulse widths of two lasers are 3.10 ns and 3.18 ns, and the pulse amplitudes are 4.40 V and 4.08 V, respectively. The temperature control circuits have the accuracy of ± 0.04 °C. According to the measurement, the nanosecond pulses and temperature control accuracy can meet the requirements of OTDR-FBG sensor system.

Key words gratings; optical time domain reflection; dual distributed feedback lasers; nanosecond pulses driving circuits; temperature control circuits

OCIS codes 060.2370; 060.3735; 060.4080

1 引 言

光纤布拉格光栅(FBG)传感网络的复用方式主要有波分复用(WDM)、时分复用(TDM)、空分复用(SDM)或它们之间的组合^[1],目前国内外的成熟方案主要采用的是 WDM。由于 WDM 方式受光源的带宽限制,其可复用的 FBG 数目严重受到限制(一般只有 20~30 个)^[2~5]。利用光时域反射(OTDR)原理并

结合低反射率的光纤光栅构成的 OTDR-FBG 应变测量系统,可对串联在一根光纤上的几百甚至上千个低反射率 FBG 进行高空间分辨的应变测量^[6~10]。为了扩大应变测量的范围,提出使用两个不同波长的分布反馈式(DFB)激光器作为光源,交替地产生窄脉冲光对 FBG 传感阵列进行扫描来获得传感信号,这样可大大地扩展应变测量的动态范

收稿日期: 2011-10-27; 收到修改稿日期: 2011-12-30

基金项目: 国家自然科学基金(60878050)及陕西省教育厅科学研究计划(2010JK716)资助课题。

作者简介: 章鹏博(1986—),男,硕士研究生,主要从事光纤传感及光纤通信等方面的研究。

E-mail: zhpengb2005@163.com

导师简介: 胡辽林(1968—),男,博士,副教授,主要从事光纤传感及光纤通信等方面的研究。

E-mail: huliaolin@vahoo.com.cn(通信联系人)

围。本文主要介绍 OTDR-FBG 传感系统中的双 DFB 激光器的驱动设计,包括纳秒脉冲驱动电路、温控电路及相应的测试结果。

2 OTDR-FBG 应变测量系统

OTDR-FBG 多点应变测量系统如图 1 所示。主要由两个 DFB 激光器和相应的脉冲驱动电路与温控电路、低反射率 FBG 阵列、光耦合器、光环行器、光探测器、信号处理与显示等部分构成。两个

DFB 激光器交替输出的窄脉冲光,经光耦合器(分光比为 10:90)分成两路,90% 的一路经过光环行器到达 FBG 传感器阵列;10% 的一路到达用于触发的光探测器 1(PIN-FET1),这一路信号也作为系统探测的时间基准以确定发生应变的 FBG 位置。每个 FBG 传感器反射的光再经过光环行器到达信号光探测器 2(PIN-FET2),光电转换后到数字示波器,最后进行信号处理。

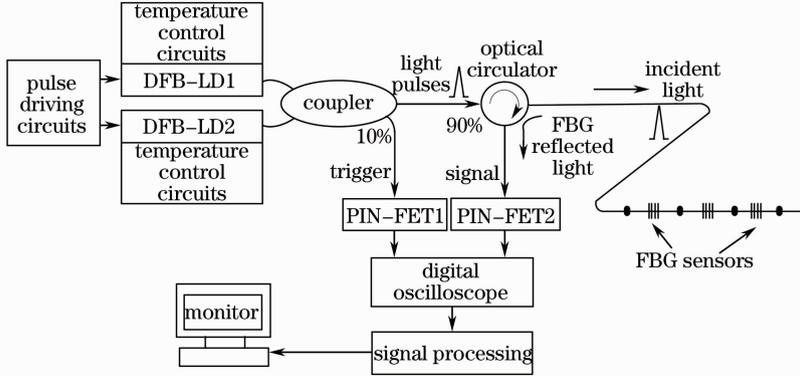


图 1 双激光 OTDR-FBG 多点应变测量系统

Fig. 1 Dual lasers OTDR-FBG multi-points strain measurement system

图 2(a)和(b)分别为使用单激光和双激光的 FBG 应变测量原理图。如果在系统测量时使用单个 DFB 光源,假设在整个测量过程中激光器的光谱是不变的(通过温控电路稳定)。若在 FBG 传感器上加应变,则 FBG 的反射谱[图 2(a)中实线]将向长波长方向移动,移动后的 FBG 反射谱如图 2(a)中的虚线所示。探测到的反射光强度变化 $P(\epsilon)$ 是应变 ϵ 的函数,通过 FBG 的反射谱 $r(\lambda)$ 和激光光谱 $\phi(\lambda)$ 的卷积来计算,表示为

$$P(\epsilon) = \int_{-\infty}^{\infty} r\left(\lambda - \frac{\partial \lambda}{\partial \epsilon} \epsilon\right) \cdot \phi(\lambda) d\lambda. \quad (1)$$

当所加的应变较小时,FBG 反射谱的移动始

终在 DFB 的探测范围内,如图 2(a)中虚线所示。当 FBG 遭受的应变较大时,FBG 的反射谱势必移出激光器 DFB 的探测范围,如图 2(b)中虚线所示,因此使用一个激光器就无法测量。如果使用两个 DFB 激光器进行探测,如图 2(b)所示,当 FBG 反射谱移出 DFB1 的检测范围时,通过 DFB2 来测量应变,因此使用双 DFB 激光的 FBG 的应变测量范围与使用单个激光器相比扩大了 1 倍。使用双 DFB 光源是本系统的创新点,需要注意两个问题:激光器波长要与 FBG 反射谱的波长相匹配;DFB1 和 DFB2 的波长间隔要适度。实验中使用的两个 SLT5411 型 DFB 激光器的中心波长分别为 1542 nm

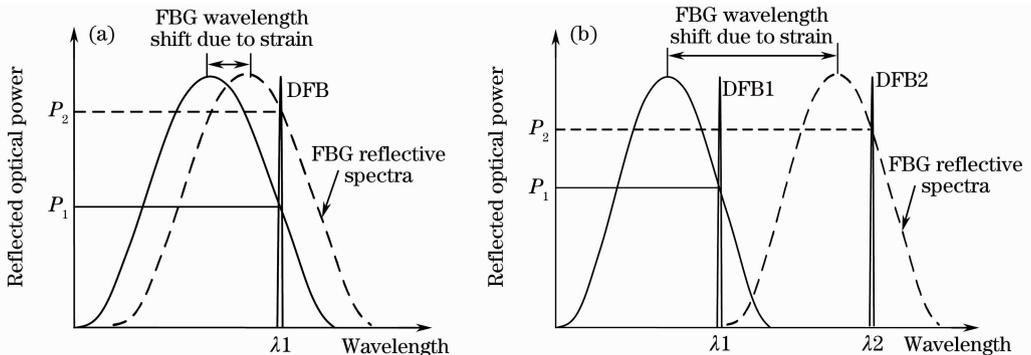


图 2 OTDR-FBG 应变测量原理。(a)单激光;(b)双激光

Fig. 2 OTDR-FBG strain measurement principle. (a) Single DFB; (b) dual DFBs

和 1544 nm, FBG 的标称中心波长均为 1542 nm。日本能把光纤光栅的反射率做到 0.1%, 由于国内条件的限制, 实验中使用的光纤光栅是厂家提供的反射率为 5% 的 FBG, 系统中串联了 10 个 FBG。

系统中两个相邻 FBG 能够达到的最短距离, 即距离(空间)分辨率, 由光脉冲的宽度决定。距离(空间)分辨率可表示为

$$L_{\min} = (\delta\tau \times c) / (2n), \quad (2)$$

式中 $\delta\tau$ 是激光脉冲的脉宽, c 为真空中的光速 (3×10^8 m/s), n 为光纤纤芯的折射率(取 1.5)。光脉冲的宽度越窄, 距离(空间)分辨率就越高, 考虑到光电探测器的响应时间, 使用纳秒电脉冲来驱动两个 DFB 激光器交替产生纳秒光脉冲。

3 双 DFB 激光器的驱动设计

3.1 总体框图

双 DFB 激光器的驱动电路总体设计框图如图 3 所示。主要包括方波信号发生器、脉冲整形电路、纳秒脉冲产生电路、温控电路、两个 DFB 激光器等。方波信号发生器产生占空比为 1:1、重复频率为 10 kHz 的方波信号, 经过脉冲整形电路整形后得到具有一定脉宽和幅值的窄脉冲, 用来触发纳秒脉冲产生电路, 最终获得两路满足 DFB 激光器驱动

要求的纳秒电脉冲。

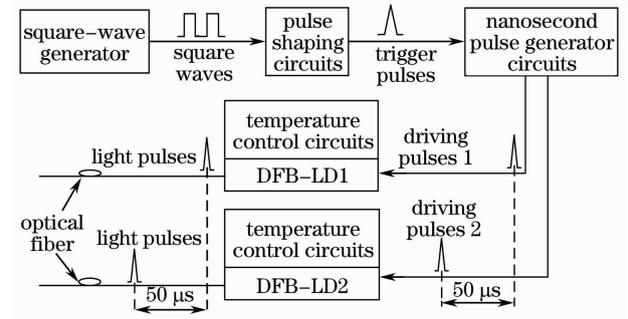


图 3 双 DFB 激光器驱动电路的总体设计框图

Fig. 3 Block diagram of dual DFBs driving circuits

3.2 纳秒脉冲驱动电路设计

双 DFB 激光器脉冲驱动电路原理图如图 4 所示^[11~14]。方波信号经过图 4 中所示的门电路各节点时产生的信号波形如图 5 所示, (a) 和 (b) 分别为触发脉冲 1 和触发脉冲 2 的波形产生过程。方波信号在经过与非门(74AS00N)、非门(74AS04N)组成的脉冲整形电路时, 由于竞争冒险原因以及外加的 RC 延迟电路会使到达门输入端的两路信号电平产生时间差异, 经过门电路的逻辑运算, 最后输出具有一定脉宽和幅值的窄脉冲, 经实验测定, 其宽度为十几纳秒, 反向过冲较大, 不适合直接驱动激光器, 但可以作为下一级纳秒脉冲产生电路的触发脉冲。

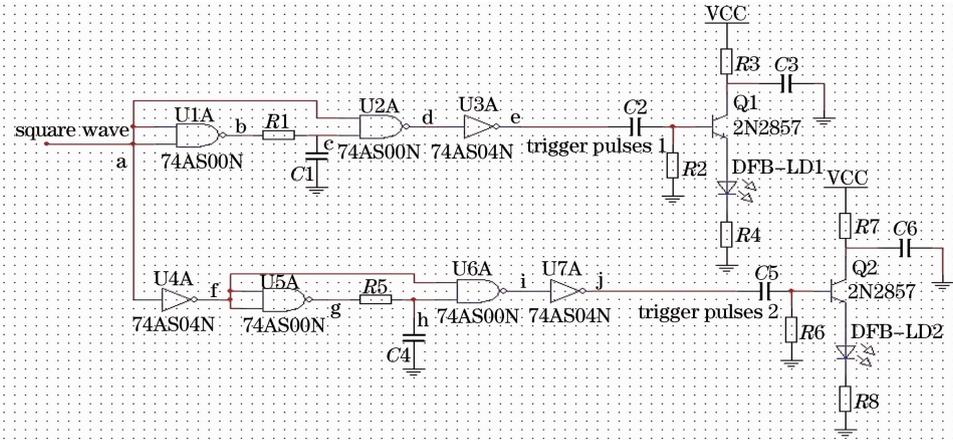


图 4 双 DFB 激光器驱动电路原理图

Fig. 4 Schematic of dual DFBs driving circuits

将脉冲整形电路产生的两路触发脉冲分别接入以 2N2857 型雪崩晶体管为核心的纳秒脉冲产生电路。集电极电压(VCC)使雪崩晶体管处于雪崩的临界状态, 雪崩晶体管基极没有输入信号时, 雪崩晶体管处于截止状态, 同时对电容 C3 和 C6 进行充电; 当上一级电路产生的触发脉冲进入雪崩晶体管基极时, 雪崩晶体管由于发生雪崩而导通, C3 和 C6 通过各自的雪崩晶体管放电, 这样就能得到一个纳

秒级的电脉冲。用得到的纳秒电脉冲驱动 DFB 激光器就得到纳秒光脉冲。

方波信号的重复频率为 10 kHz, 从图 5 中 e 和 j 节点的波形可以得到触发脉冲 1 和触发脉冲 2 的周期均为 100 μ s, 触发脉冲 2 相对于触发脉冲 1 有半个周期的延迟, 因此它们交替的时间间隔为 50 μ s, 那么最终得到的两路纳秒脉冲驱动双 DFB 激光器以 50 μ s 的间隔交替发出脉冲光。由于门电

路的延迟时间是固定的,调节 RC 延迟电路可以调节触发脉冲的脉宽和幅值,从而可以调节驱动激光

器的脉冲参数。

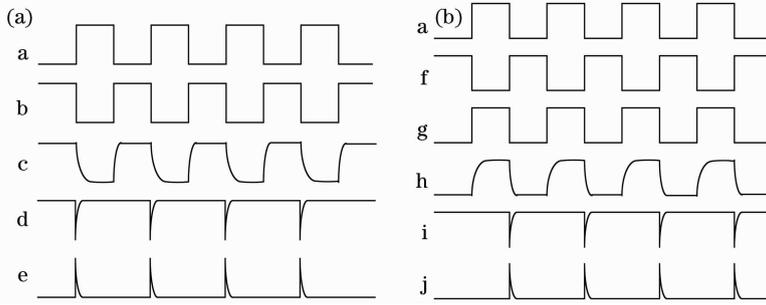


图 5 门电路各节点的信号波形图。(a)触发脉冲 1 产生过程;(b)触发脉冲 2 产生过程

Fig. 5 Signal waveforms of each node in gate circuits. (a) Generating process of trigger pulses 1; (b) generating process of trigger pulses 2

经泰克 TDS5104B 型数字示波器探测,得到用来驱动 DFB1 和 DFB2 的纳秒驱动脉冲 1 和驱动脉冲 2 如图 6 所示。图 6(a)中 DFB1 的纳秒驱动脉冲 1 宽度为 3.18 ns,幅值为 4.40 V;图 6(b)中 DFB2 的纳秒驱动脉冲 2 宽度为 3.10 ns,幅值为 4.08 V。

脉宽基本一致,幅值稍微不同,其原因是两路驱动脉冲产生的路径不同,参数调节是通过各自的 RC 电路实现的。从图 6 可以看出,获得的纳秒脉冲稳定,波形光滑,反向过冲很小,完全可以满足激光器驱动的要求。

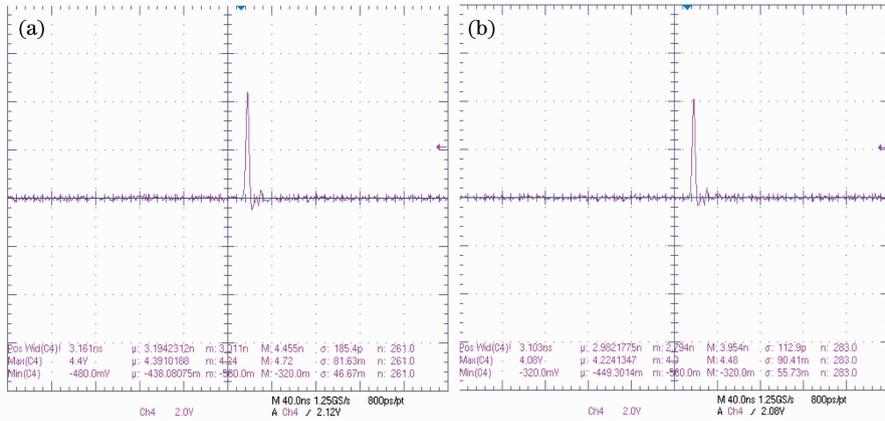


图 6 驱动激光器的电脉冲波形。(a) DFB1 的纳秒驱动脉冲 1;(b) DFB2 的纳秒驱动脉冲 2

Fig. 6 Pulse waveforms of driving lasers. (a) Nanosecond pulse 1 for driving DFB1; (b) nanosecond pulse 2 for driving DFB2

3.3 温控电路

激光器工作时由于温度变化会导致激光器的输出波长发生漂移,使其不能与 FBG 反射谱之间很好地匹配,影响系统的测量精度。利用高性能热电制冷控制器 ADN8830 制作的温度控制电路^[15~17]如图 7 所示,将激光器温度转换成对应的热敏电阻电压,再与设定的温度电压通过高精度运放比较后得到一个误差电压,将误差电压经过高增益放大器放大,同时使用比例积分微分(PID)网络对激光器温度变化引起的相位延迟进行补偿,最后由 ADN8830 芯片控制两组金属氧化物半导体场效应晶体管(MOSFET)构成的 H 桥的截止与导通,从而驱动半导体制冷器(TEC)对激光器进行制冷或加热。

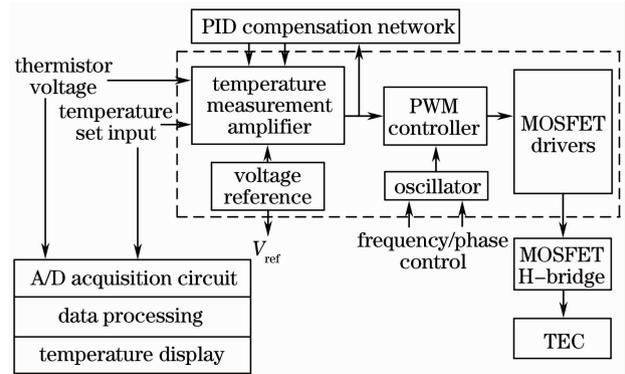


图 7 温控电路框图

Fig. 7 Block diagram of temperature control circuits

使用 SLT5411 型 DFB 激光器内部封装的热敏电阻和 TEC 对激光器进行温度测试,当激光器温度在设定温度的 $\pm 0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内时,温控电路会自动锁定。实验设定温度为 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$,最终温度稳定在 $25\pm 0.04\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。将从环境温度到最终稳定温度的实验数据在 Origin 软件中进行数据处理后得到如图 8 所示的温度控制曲线。由图 8 可以看出测量温度在前 200 s 内振荡且振荡幅度逐渐缩小,200 s 之后逐渐趋于稳定。

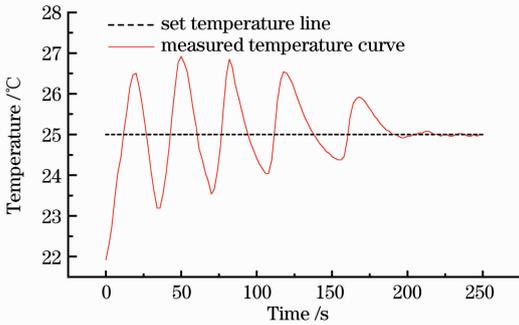


图 8 温控电路温度测试曲线

Fig. 8 Test curve of temperature control circuit

4 实验

利用设计的驱动电路在图 1 所示的 OTDR-FBG 系统上做实验。首先进行 DFB 激光器驱动实验,由于两个激光器发光的交替时间间隔为 $50\text{ }\mu\text{s}$,示波器界面显示的时间宽度有限,不能同时清晰分辨这两个光脉冲,在对 DFB1 和 DFB2 进行同时驱动时,单独探测各自输出波形。图 9 为光电探测器分别探测到的两个激光器的光脉冲,DFB1 的光脉冲脉宽为 4.35 ns ,幅值为 1.86 V (纵轴 500 mV/div),DFB2 的光脉冲脉宽为 4.31 ns ,幅值为 2.00 V (纵轴 1 V/div)。光脉冲的宽度决定系统的空间分辨率,两个 DFB 输出脉冲的宽度基本一致,根据距离(空间)分辨率计算(2)式和测量的激光脉冲宽度,可得到系统的空间分辨率为 43 cm 左右。幅值的稍微差异对系统的测量没有多大影响,因为应变是与反射光功率的变化有关,并且可以通过限流电阻调节。

然后在测量光纤上串联 10 根反射率为 5% 的 FBG,在未加应变时使用 PINFET2 光电探测器探测,示波器上可观察到如图 10 所示的 FBG 阵列的反射信号。由于经过了激光器的电光转换、光纤色散、光电探测器的光电转换,FBG 反射光信号与激光器输出脉冲相比有一定的展宽。

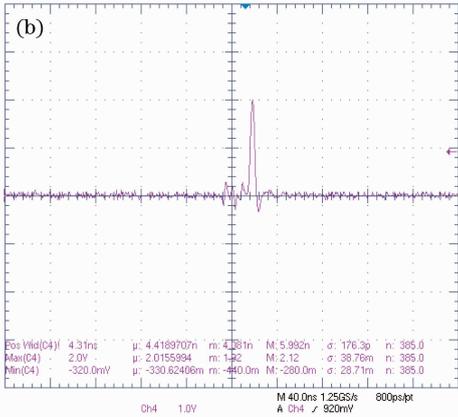
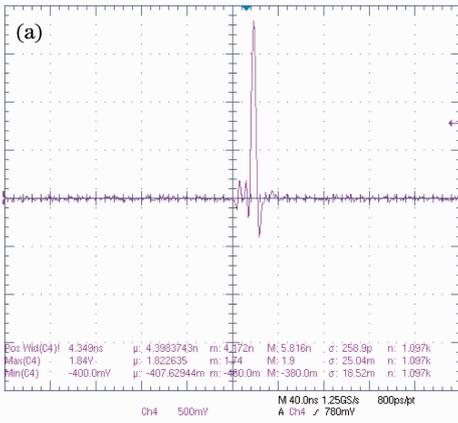


图 9 两个激光器的输出波形。(a) DFB1;(b) DFB2

Fig. 9 Two lasers output waveforms.

(a) DFB1;(b) DFB2

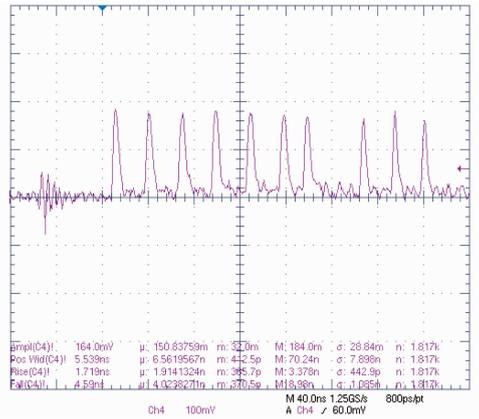


图 10 探测到的 FBG 反射光信号

Fig. 10 Detected FBG reflective light signal

5 结论

提出使用两个 DFB 激光器作为 OTDR-FBG 传感系统的光源,设计了相应的纳秒脉冲驱动电路和温控电路,得到两个 DFB 激光器的驱动脉冲宽度分别为 3.10 ns 和 3.18 ns ,脉冲幅值分别为 4.40 V 和 4.08 V ,设计的温控电路的控制精度为 $\pm 0.04\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。经测试得到了比较稳定的反射信号,满足 OTDR-FBG 传感系统的要求。

参 考 文 献

- 1 Wang Yubao, Lan Haijun. Study of fiber Bragg grating sensor system based on wavelength-division multiplexing/time-division multiplexing[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(8): 2196~2201
王玉宝, 兰海军. 基于光纤布拉格光栅波/时分复用传感网络研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(8): 2196~2201
- 2 J. P. Dakin, M. Volanthen. Distributed and multiplexed fiber grating sensors, including discussion of problem areas[J]. *IEICE Trans. Electron.*, 2000, **E83-C**(3): 391~399
- 3 T. A. Berkoff, A. D Kersey. Fiber Bragg grating array sensor system using a bandpass wavelength division multiplexer and interferometric detection [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1996, **8**(11): 1522~1524
- 4 L. C. G. Vattente, A. M. B. Braga, W. Eche *et al.*. Time and wavelength multiplexing of fiber Bragg grating sensors using a commercial OTDR[J]. *IEEE*, 2002. 151~154
- 5 Jiang Desheng, Fan Dian, Mei Jiachun *et al.*. Multiplexing/demultiplexing technology based on fiber Bragg grating sensors [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2005, **42**(4): 14~19
姜德生, 范典, 梅加纯等. 基于FBG传感器的分复用技术[J]. *激光与光电子学进展*, 2005, **42**(4): 14~19
- 6 Zhang Manliang, Sun Qizhen, Wang Zi *et al.*. Investigation on distributed optical fiber sensor based on identical-low-reflective fiber gratings [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, **48**(8): 080604
张满亮, 孙琪真, 王梓等. 基于全同弱反射光栅光纤的分布式传感研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2011, **48**(8): 080604
- 7 Y. Enami, H. Iwashima, T. Kobayashi. Fiber strain sensor using low reflective fiber Bragg gratings[C]. Baltimore; CLEO (Conference on lasers and Electro-Optics), 2005, CTuH3
- 8 Liu Chuan, Rao Yunjiang, Ran Zengling *et al.*. Long-distance fiber Bragg grating sensor system based on time division multiplexing and narrow wavelength swept laser [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(11): 2004~2005
刘川, 饶云江, 冉曾令等. 基于时分复用和窄波长扫描激光的长距离光纤布喇格光栅传感系统[J]. *光子学报*, 2010, **39**(11): 2004~2005
- 9 C. Song, S. K. Lee, S. H. Jeong *et al.*. Absolute strain measurements made with fiber Bragg grating sensors[J]. *Appl. Opt.*, 2004, **43**(6): 1337~1341
- 10 Po Zhang, H. H. Cerecedo-Nuñez, B. Qi *et al.*. Optical time-domain reflectometry interrogation of multiplexing low-reflectance Bragggrating-based sensor system [J]. *Opt. Engng.*, 2003, **42**(6): 1597~1603
- 11 Zhang Haiming, Liu Xusheng, Lu Xiaoyuan *et al.*. Design of laser diode driver with high peak current and narrow pulse width [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2009, **30**(2): 313~315
张海明, 刘旭升, 陆晓元等. 大电流窄脉冲半导体激光驱动器设计[J]. *半导体光电子学*, 2009, **30**(2): 313~315
- 12 Liu Xusheng, Lin Jiuling, Zhang Haiming *et al.*. The study of nanosecond pulsed diode laser drive[J]. *Laser Technology*, 2006, **30**(4): 445~448
刘旭升, 林久令, 张海明等. 纳秒脉冲半导体激光驱动器的研究[J]. *激光技术*, 2006, **30**(4): 445~448
- 13 Yang Yan, Yu Dunhe, Wu Yaofang *et al.*. Design of a novel drive power for narrow pulse laser diode[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(2): 0202003
杨燕, 俞敦和, 吴姚芳等. 新型窄脉冲半导体激光器驱动电源的研制[J]. *中国激光*, 2011, **38**(2): 0202003
- 14 Lai Yiping, Cai Tao, Peng Zhihong *et al.*. Multi-current 1550 nm laser driving circuit based on avalanche transistors [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, **36**(Suppl.): 349~352
赖艺平, 蔡涛, 彭志红等. 基于雪崩晶体管的多电流1550 nm激光驱动电路[J]. *红外与激光工程*, 2007, **36**(增刊): 349~352
- 15 ADI. ADN8830 Thermoelectric Cooler Controller Data Sheet [Z]. 2003. A.
- 16 Yang Zhang, James Ashe. Designing a high performance TEC controller[C]. *SPIE*, 2002, **4913**: 177~183
- 17 Qin Xiqing, Zeng Xianghong, Dong Jing *et al.*. A high performance TEC controller circuit based on ADN8830 [J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2004, **2**(1): 20~22
覃喜庆, 曾祥鸿, 董静等. 基于ADN8830的高性能TEC控制电路[J]. *光学与光电技术*, 2004, **2**(1): 20~22

栏目编辑: 谢 婧