

光电探测器特性在 TDLAS 气体检测中的影响

王 燕¹ 张 锐^{2,3*}

¹天津城建大学计算机与信息工程学院, 天津 300384

²天津科技大学电子信息与自动化学院, 天津 300222

³天津大学精密仪器与光电子工程学院, 天津 300072

摘要 在应用可调谐二极管激光吸收光谱(TDLAS)技术进行气体检测时,气体检测精度受系统各功能模块性能的影响,针对这个问题研究了系统中光电探测器的输出电流噪声谱密度和响应度两种特性。推导出了探测器输出电流表达式,得出了输出电流噪声谱密度特性与激光器相对强度噪声(RIN)有关的结论,并通过实验验证了TDLAS系统中激光器RIN的存在。通过仿真,研究了RIN对探测器输出电流的影响,给出了不同条件时的电流噪声谱密度曲线。为避免环境温度的变化影响光电探测器响应度,采用一种实时校正方法,给出了其原理及校正公式。以氨气为检测对象,运用该方法对氨气浓度曲线进行校正。

关键词 光谱学;可调谐二极管激光吸收光谱;光电探测器;电流噪声谱密度特性;响应度特性;相对强度噪声

中图分类号 O443.4

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201636.0230002

Photo Detector Characteristics Effect on TDLAS Gas Detection

Wang Yan¹ Zhang Rui^{2,3}

¹School of Computer and Information Engineering, Tianjin Chengjian University, Tianjin 300384, China

²College of Electronic Information and Automation, Tianjin University of Science & Technology, Tianjin 300222, China

³College of Precision Instruments and Opto-Electronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China

Abstract The precision of gas detection is affected by each function module performance of the system, when tunable diode laser absorption spectroscopy (TDLAS) is applied in gas detection. So the output current noise spectral density and the responsivity characteristics of photo detector are studied. The paper deduces the expression of the output current of photo detector, and the conclusion that the current is related to laser relative intensity noise (RIN), which exists in TDLAS experimental system. Effect of RIN on the output current of photo detector is studied by simulation, and the curve of current noise spectral density on different conditions is given. To avoid the photo detector responsivity being affected by ambient temperature, a real-time correction method is designed with the given principle and formula. Taking ammonia gas as an example, the concentration curve is corrected by using the method.

Key words spectroscopy; tunable diode laser absorption spectroscopy; photo detector; current noise density characteristic; responsivity characteristic; relative intensity noise

OCIS codes 300.6170; 300.6260; 200.4560

1 引 言

可调谐二极管激光吸收光谱(TDLAS)是利用激光强度被待测气体吸收形成吸收光谱的原理进行气体检测的一种技术^[1-6]。它具有灵敏度高、选择性好、实时、动态快速、多组分测量等优点。气体检测受系统中的很多因素影响,一个因素是系统各功能模块的性能,其中光电探测器是TDLAS系统必不可少的组成部分,作

收稿日期: 2015-8-10; 收到修改稿日期: 2015-10-9

基金项目: 国家科技支撑计划(2013BAD19B03)、天津市应用基础与前沿技术研究计划(14JCYBJC22800)、天津市科技特派员项目(15JCTPJC60800)

作者简介: 王 燕(1979—),女,博士,主要从事光谱技术等方面的研究。E-mail:wangyanzr2014@sina.com

*通信联系人。E-mail:zhangrui@tust.edu.cn

用是将经过待测气体吸收的光谱信号进行光电转换。TDLAS检测信号受光电探测器的输出电流噪声谱密度和响应度特性影响,输出电流噪声谱密度特性可指导选择合适的激光器、确定合适的光路以及系统参数中的调制频率,响应度影响光谱检测信号的幅值,给检测结果引入误差。光电探测器电流噪声以激光器相对强度噪声(RIN)为主,分布可用电流噪声谱密度来衡量^[7]。目前,国内外很多学者研究了激光器RIN噪声的测量^[8]、转移特性^[9-11]、减小方法^[12]、激光器不同参数对RIN的影响^[13-15],以及RIN噪声对TDLAS系统检测信号的影响^[7],然而上述文献并未给出不同条件时光电探测器电流噪声谱密度的分布情况。此外,光电探测器的响应度受温度影响,若采用恒温装置对探测器实现恒温,则增加了系统的复杂性。

针对上述问题,本文从理论上分析了RIN对光电探测器电流的影响,给出了不同RIN噪声 N_{RIN} 、不同幂律谱系数 α 、不同探测器上平均光功率 P_{DC0} 时的光电探测器的电流噪声谱密度曲线;同时,对于探测器响应度受环境温度变化所影响,采用一种气体浓度实时校正手段。为提高气体检测精度提供了相关理论依据,也提高了气体的检测精度。

2 光电探测器

光电探测器是TDLAS系统中进行光电转换的器件,图1是TDLAS气体检测系统。系统主要包括分布式反馈(DFB)激光器、激光驱动器、调制信号发生器、气体吸收池、光电探测器、前置放大器、锁相放大器、数据采集卡和计算机监控系统。

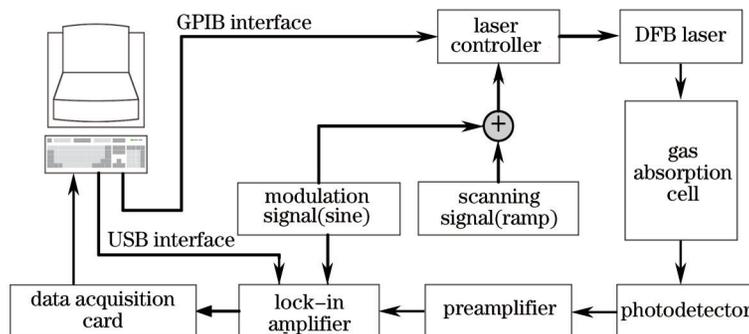


图1 TDLAS实验系统

Fig.1 TDLAS experiment system

实验系统中使用InGaAs材料的光电探测器,工作波长范围是900~1700 nm,其光谱响应曲线如图2所示,在波长1000~1600 nm内响应曲线较平坦。电流调谐技术的波长扫描范围通常在0.2~0.5 nm之间,探测器的光谱响应曲线可近似认为不变。

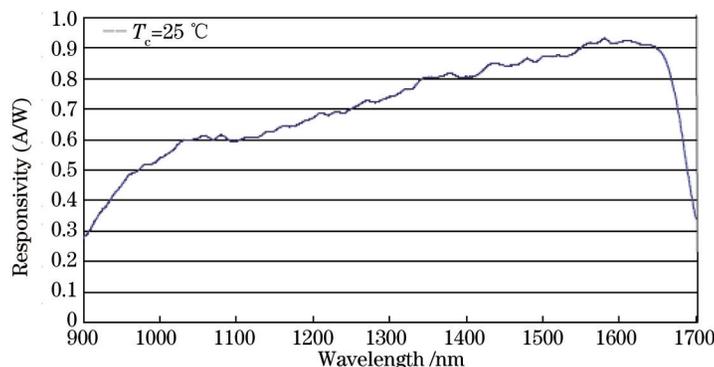


图2 光电探测器光谱响应曲线

Fig.2 Spectral responsivity of photo detector

3 电流噪声谱密度特性

DFB激光器的总注入电流可表示为

$$i(t) = i_0 + i_i(t) + \delta_i \cos(2\pi f_m t), \quad (1)$$

式中 $i(t)$ 由 3 部分电流成分组成, i_0 为激光驱动器本身设置的驱动电流, f_m 是高频调制信号频率, i_i 为低频锯齿波扫描信号电流, $\delta_i \cos(2\pi f_m t)$ 为高频调制信号电流。激光器光功率 $P_{opt}(t)$ 为

$$P_{opt}(t) = P_0 + \eta_{slope} [i_i(t) + \delta_i \cos(2\pi f_m t)], \quad (2)$$

式中 P_0 是电流为 i_0 时的光功率, η_{slope} 是 DFB 激光器在高于阈值电流时电流-功率的转换系数。气体吸收后的光功率 $P_{gas}(t)$ 为

$$P_{gas}(t) = P_{opt}(t) T[v(t)], \quad (3)$$

$$i_{pd}(t) = R P_{gas}(t), \quad (4)$$

式中 $T[v(t)]$ 为传输系数, R 是探测器的转换系数, $i_{pd}(t)$ 是探测器输出电流。考虑噪声影响和无气体吸收, $i_{pd}(t)$ 可以写为:

$$i_{pd}(t) = R P_{opt}(t) + R N_{RIN}(t) + i_{shot}(t), \quad (5)$$

式中 $P_{opt}(t)$ 是根据(2)式得到的输出光功率, $N_{RIN}(t)$ 是 RIN, 即激光器产生的附加的光功率波动, $i_{shot}(t)$ 表示光电探测器散粒噪声, 并等效成输入噪声电流。散粒噪声与频率无关, 属于白噪声, 由于本文研究在一定带宽内电流噪声谱密度的情况, 故不考虑 $i_{shot}(t)$, 只讨论 $N_{RIN}(t)$ 对 $i_{pd}(t)$ 的影响。因此, 光电探测器的输出电流噪声谱密度可用 RIN 电流噪声谱密度表示。

3.1 激光器 RIN 噪声

RIN 描述了激光输出功率的强度波动, 即使是恒定的电流输入也会发生波动。在几百千赫兹的频率范围内, DFB 激光器的 RIN 噪声具有 $1/f^\alpha$ 特性, α 取 0.5~1.6 范围的连续值, 与激光器特性有关^[16]。RIN 定义为在某个频率下的 1 Hz 带宽内探测到的电子噪声功率与直流信号功率的比值^[17]:

$$N_{RIN} = \frac{\Delta_i^2}{I_{DC}^2}, \quad (6)$$

式中 Δ_i^2 是在 1 Hz 带宽内的平均噪声, I_{DC} 是平均直流光电流, 与激光器特性、光路有关。光电流与光功率是成比例的, (6) 式中用光功率代替光电流也是成立的。图 3 是实验系统中 DFB 激光器中心波长功率的变化曲线, 实验条件是: 输出中心波长为 1512 nm, 温度为 29 °C, 时间 24 h, 驱动电流为 50 mA, 引入的电流波动为 0.0025 mA, 功率波动相应为 0.0028 mW。由图可以看出, 在 24 h 内, 激光器的功率波动范围为 0.02 mW, 驱动器引入的功率波动与其相差一个数量级, 说明图 3 中的功率波动主要原因是驱动电流为直流时的 RIN 噪声引起的^[8], 相对波动达 0.2%。

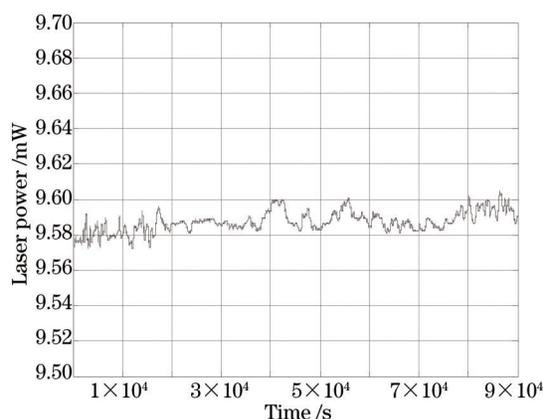


图 3 DFB 激光器中心波长功率变化曲线

Fig.3 Change of power for central wavelength of DFB laser

3.2 仿真分析

研究光电探测器的输出电流噪声谱密度, 即可研究 RIN 电流噪声谱密度。为使 N_{RIN} 具有实际情况的幅值大小, 对图 1 实验系统中的 DFB 激光器进行了噪声测量, 它由 ILX 3900 驱动, 测量在 30 kHz 上产生 -140 dB 的 N_{RIN} 。

RIN 电流噪声谱密度与在某频率处的 N_{RIN} 、幂律谱系数 α 、探测器上平均光功率 P_{DC0} 有关。由于 N_{RIN} 与激光驱动器噪声和激光器工作电流有关,在 TDLAS 系统检测过程中, N_{RIN} 在一定范围内变化,因此在仿真中包含不同水平的 N_{RIN} 。在满仿真带宽 500 kHz 内分析了 N_{RIN} 的各自频谱贡献率。其中激光器最大出射激光功率为 20 mW,到达光电探测器的平均光功率为 $P_{DC0}=1\sim 6$ mW(用光功率计测量),探测器的响应度为 0.88 A/W,这是 InGaAs 探测器在近红外光谱区域的典型值。以下分别仿真了不同 N_{RIN} 、不同 α ,不同 P_{DC0} 下光电探测器的电流噪声谱密度。

图 4 中展示了 $\alpha = 1, P_{DC0}=3.5$ mW 时不同 N_{RIN} 对电流噪声谱密度的贡献。由于其具有 $1/f$ 特性并用电子功率比值表示,光电探测器电流噪声的谱密度具有 $1/\sqrt{f}$ 特性,在 2 个数量级的频率范围内变化 10 倍。随着调制频率的增加,电流噪声谱密度单调减少,若 N_{RIN} 为 -140 dB,系统要求电流噪声谱密度在 $500 \text{ pA}/\sqrt{\text{Hz}}$ 以下,则调制频率需大于 20 kHz。

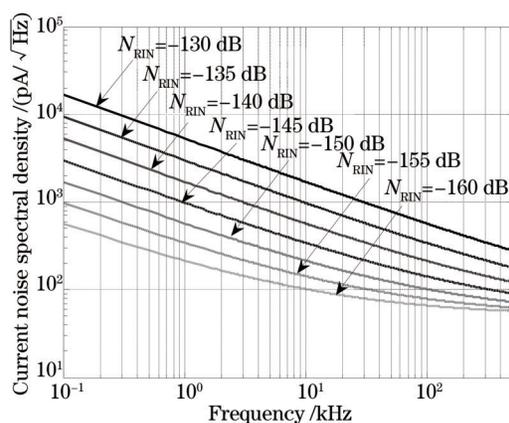


图 4 不同 N_{RIN} 条件下光电探测器的电流噪声谱密度曲线

Fig.4 Current noise spectral density of photo detector on the different conditions of N_{RIN}

图 5 中展示了 $N_{RIN}=-140$ dB, $P_{DC0}=3.5$ mW 时不同幂律谱系数 α 对电流噪声谱密度的贡献。调制频率固定时,随着 α 的增加,电流噪声谱密度单调减少。图 6 中展示了 $\alpha = 1, N_{RIN}=-140$ dB,不同 P_{DC0} 对电流噪声谱密度的贡献。调制频率固定时,随着 P_{DC0} 的增加,电流噪声谱密度单调减少。

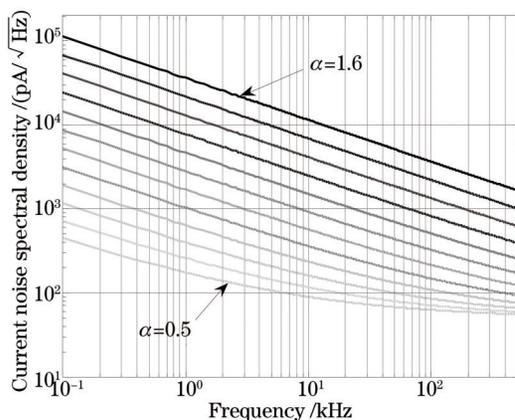


图 5 不同 α 条件下光电探测器的电流噪声谱密度曲线

Fig.5 Current noise spectral density of photo detector on the different conditions of α

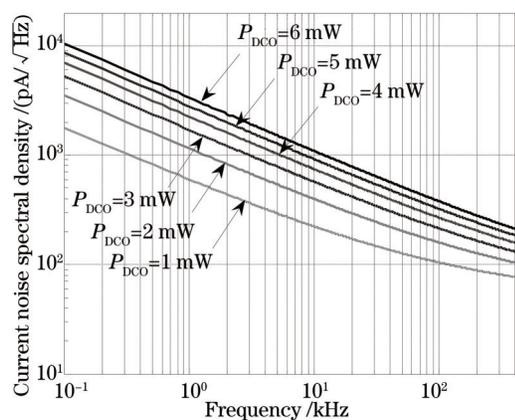


图 6 不同 P_{DC0} 条件下光电探测器的电流噪声谱密度曲线

Fig.6 Current noise spectral density of photo detector on the different conditions of P_{DC0}

由图 4~6 可以看出,随着调制频率的增加,电流噪声谱密度呈下降趋势,对于图 4 和图 5,调制频率取 $10^{-1}\sim 10^1$ 范围时,电流谱密度下降变化明显,当大于 10^1 时,下降缓慢。对于图 6,在 500 kHz 范围内,下降变化都比较明显。虽然调制频率的提高可降低电流噪声谱密度,然而也会增加设备的复杂性,若系统要求小于某个电流噪声谱密度,由图 4~6 得出对应的 N_{RIN} 、 α 、 P_{DC0} ,由此可指导选择合适的激光器,确定合适的光路以及系统参数。

4 响应度特性

在采用TDLAS系统进行气体检测时,环境温度的变化会影响光电探测器响应度,进而改变光谱检测信号幅值,对检测结果带来误差。为使系统不受响应度变化所影响及不增加系统的复杂性,提出一种实时校正方法。校正公式为

$$C = C_D \frac{V_{PD,R}}{V_{PD,D}} = KC_D \quad (7)$$

式中 C_D 是未校正的气体浓度(体积分数), C 是已校正的气体浓度, $V_{PD,D}$ 是气体检测时探测器输出信号的平均值, $V_{PD,R}$ 是气体检测前探测器输出信号稳定时的平均值。

在波长调制光谱技术中,由图1中信号发生器产生驱动激光器波长变化的低频扫描信号(锯齿波)和高频调制信号(正弦波),两路电压信号叠加后输入激光驱动器,将其转换为电流信号后,控制激光器的输出波长和温度。通过选择合适的激光器工作温度,使气体的吸收峰位于锯齿波的中心位置,以避免锯齿波最大值和最小值受气体吸收影响。气体检测前即未通样气时,将探测器放置在恒温箱中,设定恒温箱温度为 T_0 ,利用数据采集卡采集得到锯齿波数据,在每个周期内,取其最大值和最小值的平均值作为探测器输出信号的平均值,得到 $V_{PD,R}$ 。在实际气体检测时,将探测器从恒温箱中取出,用同样方法测得探测器输出信号的平均值 $V_{PD,D}$,气体浓度用谐波曲线峰值反演,该校正方法用 $V_{PD,R}$ 与 $V_{PD,D}$ 校正气体浓度曲线,则校正后的气体浓度曲线为 T_0 时的曲线。

在常温 $18\text{ }^\circ\text{C}$ 时,时长约 1 h ,未通样气时测量探测器输出幅值如图7所示,平均值为 2.047 。通入 1% (体积分数)的氨气后,时长约 10 h ,测量气体浓度。通样气时的探测器输出幅值如图8所示,校正前后气体浓度输出幅值曲线如图9所示。

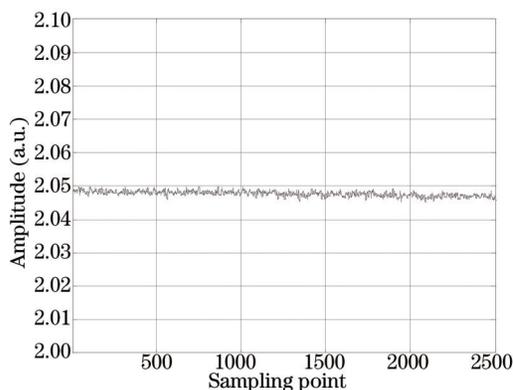


图7 未通样气时光电探测器输出幅值曲线

Fig.7 Output amplitude of photo detector with no passing gas

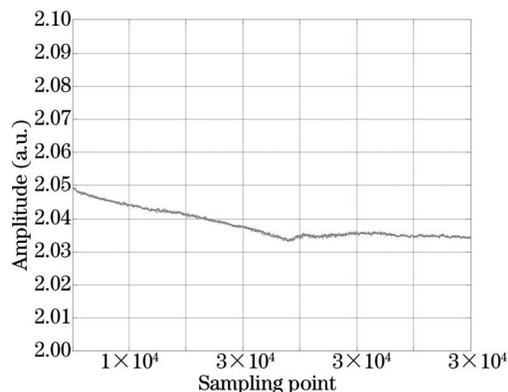


图8 通样气时光电探测器输出幅值曲线

Fig.8 Output amplitude of photo detector with passing gas

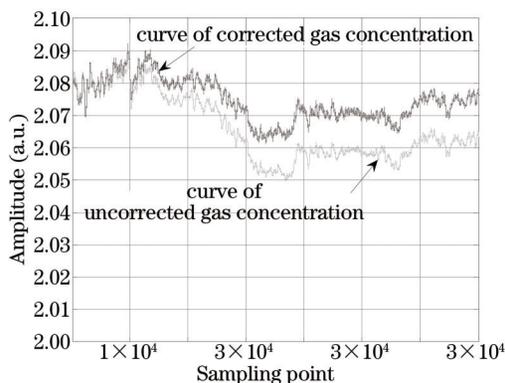


图9 校正前后气体浓度输出幅值曲线

Fig.9 Output amplitude of gas concentration before and after correction

由图7所示,在温度为 T_0 的恒温箱中,未通样气时光电探测器输出的幅值基本保持在 2.048 ,说明探测器

在恒温条件下的输出幅值基本恒定。在图8中,由于探测器没有放在恒温箱中,环境温度的变化对探测器的输出幅值是有影响的,前半段时间输出幅值下降,后半段时间基本不变。在图9中,利用(7)式校正氨气浓度曲线,校正后的浓度要高于校正前的浓度,这样可以因探测器响应度变化的影响消除掉。

5 结 论

研究了TDLAS系统中光电探测器的输出电流噪声谱密度和响应度两种特性。针对电流噪声谱密度特性,仿真不同条件时探测器的输出电流噪声谱密度与调制频率之间的关系曲线。针对光电探测器响应度易受温度影响的问题,在不增加系统复杂性的前提下,提出一种实时温度校正方法消除此影响。该研究可以指导选择合适的激光器、光路以及调制频率,降低光谱检测信号误差,最终为提高气体检测精度提供了相关理论依据。

参 考 文 献

- 1 M Lackner. Tunable diode laser absorption spectroscopy (TDLAS) in the process industries - a review[J]. *Reviews in Chemical Engineering*, 2007, 23(2): 65-147.
- 2 S Wagner, M Klein, T Kathrotia, *et al.*. In situ TDLAS measurement of absolute acetylene concentration profiles in a non-premixed laminar counter-flow flame[J]. *Applied Physics B*, 2012, 107(3): 585-589.
- 3 Zhang Rui, Zhao Xuehong, Hu Yajun, *et al.*. A new method of background elimination and baseline correction for the first harmonic[J]. *Acta Physica Sinica*, 2014, 63(7): 070702.
张 锐, 赵学虹, 胡雅君, 等. 一种用于一次谐波背景消除与基线校正的新型方法[J]. *物理学报*, 2014, 63(7): 070702.
- 4 He Junfeng, Kan Ruifeng, Xu Zhenyu, *et al.*. Derivative spectrum and concentration inversion algorithm of tunable diode laser absorption spectroscopy oxygen measurement[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(4): 0430003.
何俊峰, 阚瑞峰, 许振宇, 等. 可调谐二极管激光吸收光谱氧气测量中的导数光谱处理与浓度反演算法研究[J]. *光学学报*, 2014, 34(4): 0430003.
- 5 Yao Lu, Liu Wenqing, Liu Jianguo, *et al.*. Research on open-path detection for atmospheric trace gas CO based on TDLAS[J]. *Chinese J Lasers*, 2015, 42(2): 0215003.
姚 路, 刘文清, 刘建国, 等. 基于TDLAS的长光程环境大气痕量CO监测方法研究[J]. *中国激光*, 2015, 42(2): 0215003.
- 6 Yuan Song, Kan Ruifeng, He Yabai, *et al.*. Tunable diode laser spectroscopy system for carbon dioxide monitoring[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(12): 1208003.
袁 松, 阚瑞峰, 何亚柏, 等. 基于可调谐半导体激光光谱大气CO₂监测仪[J]. *中国激光*, 2014, 41(12): 1208003.
- 7 B Lins, R Engelbrecht, B Schmauss. Software-switching between direct absorption and wavelength modulation spectroscopy for the investigation of ADC resolution requirements[J]. *Applied Physics B*, 2012, 106(4): 999-1008.
- 8 S M Vaezi Nejad, M Cox, Cooper N. Novel instrumentation for measurement of relative intensity noise[J]. *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, 2012, 34(4): 477-486.
- 9 J Nuño, M Alcon-Camas, J D Ania-Castañón. RIN transfer in random distributed feedback fiber lasers [J]. *Optics Express*, 2012, 20(24): 27376-27381.
- 10 M Alcón-Camas, J D Ania-Castañón. RIN transfer in 2nd-order distributed amplification with ultralong fiber lasers feedback fiber lasers [J]. *Optics Express*, 2010, 18(23): 23569-23575.
- 11 G E Obarski, J D Splett. Transfer standard for the spectral density of relative intensity noise of optical fiber sources near 1550 nm[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2001, 18(6): 750-761.
- 12 Xu Jianying, Wang Xuefeng, Li Cao, *et al.*. Method of external optical intensity modulation to reduce relative intensity noise[J]. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2009, 16(6): 740-743.
徐建营, 王学峰, 李 超, 等. 光强外调制法抑制相对强度噪声[J]. *中国惯性技术学报*, 2009, 16(6): 740-743.
- 13 E Mortazy, F Shahshahani, Ahmadi V, *et al.*. The effect of grating structure on relative intensity noise in DFB laser diode[C]. *SPIE*, 2004, 5468: 154-164.
- 14 Sharma V, Singh A, Sharma A K. Analysis of the impact of laser line width over RIN, power penalty and bit rate including higher-order dispersion in WDM systems[J]. *Optik*, 2009, 120(15): 741-745.
- 15 N Dogru, Ersoy E. RIN of mode-locked external cavity lasers utilizing a sinusoidally chirped fiber Bragg grating[J]. *IEEE Journal of*

Selected Topics Quantum Electronics, 2013, 19(4): 1100107.

16 Y Takagi, N Kumazaki, M Ishihara, *et al.*. Relative intensity noise measurements of 5 μm quantum cascade laser and 1.55 μm semiconductor laser[J]. Electronics Letters, 2008, 44(14): 860-861.

17 I Joindot. Measurements of relative intensity noise (RIN) in semiconductor lasers[J]. Journal De Physique III, 1992, 2(9): 1591-1603.

栏目编辑: 刘丰瑞