

基于频率补偿的窄脉冲量子级联激光器快速驱动技术

余兆安¹, 姚志宏¹, 梁圣法¹, 张锦川², 吕铁良³

(1. 中国科学院微电子器件与集成技术重点实验室, 北京 100029;

2. 中国科学院半导体研究所, 北京 100083; 3. 山东大学(威海), 山东 威海 264209)

摘要: 脉冲量子级联激光器(QCL)因自热效应会导致谱线展宽,故需极短的电流脉冲驱动。理论极限线宽所需的脉宽为 5~15 ns,但由于环路寄生参数的影响,窄脉冲会引起信号过冲或振荡,因此目前商用的 QCL 驱动器无法满足这个要求。为获得更理想的激光器线宽,在常规脉冲恒流电路的基础上,采用频率补偿的方法来消除过冲和振荡,并设计了一款稳定的纳秒级激光器驱动电路。实验结果显示该驱动装置实现了峰值电流 0~2 A、脉宽 8.4~200 ns、上升时间<4 ns、过冲<1%的脉冲电流输出。使用中国科学院半导体研究所研制的波长 4.6 μm 激光器和傅里叶变换光谱仪进行测试,当驱动脉宽由 100 ns 减小到 10 ns 时,激光器线宽由 0.35 cm^{-1} 线性递减到 0.12 cm^{-1} 。综合验证表明,所设计的驱动装置实现了稳定的窄脉冲电流输出,尤其适用于量子级联激光器的窄线宽驱动及应用。

关键词: 量子级联激光器; 线宽; 脉冲驱动电路; LED 驱动

中图分类号: TP271.5 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.0206002

A fast driving technique for narrow pulsed quantum cascade lasers with frequency compensation

Yu Zhaoan¹, Yao Zhihong¹, Liang Shengfa¹, Zhang Jinchuan², Lv Tieliang³

(1. Key Laboratory of Microelectronic Device & Integrated Technology, Institute of Microelectronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China; 2. Institute of Semiconductor of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China;

3. Shandong University at Weihai, Weihai 264209, China)

Abstract: The line width of pulsed quantum cascade lasers (QCL) increases with the device heating up during the driving pulse, so QCL drivers need to generate ultra-short current pulse. Generally, pulses of 5 ns to 15 ns durations can reach the Fourier transform limit. However, due to the existence of parasitic parameters, narrow pulses will lead to overshoot or oscillation. Therefore, the current commercial QCL drivers can not meet this requirement. To obtain narrower line width of QCLs, a frequency compensation method based on conventional pulse constant current circuit was proposed in this work to eliminate overshoot and oscillation. And a stable pulse laser driving circuit was also designed which can output 0~2 A pulse current, with 8.4~200 ns pulse width, <4 ns rising time, and <1% overshoot. Function test was carried out with a QCL with 4.6 μm center wavelength made from Institute of Semiconductor of Chinese

收稿日期:2015-06-07; 修订日期:2015-07-10

基金项目:中国科学院微电子器件与集成技术重点实验室课题

作者简介:余兆安(1982-),男,助理研究员,主要从事气体传感器、半导体器件测量方法方面的研究。Email:yuzhaoan@ime.ac.cn

通讯作者:吕铁良(1963-),男,教授,博士生导师,主要从事气体传感器、系统集成、测控技术方面的研究。Email:TL_L@wh.sdu.edu.cn

Academy of Sciences, and a Fourier transform infrared spectroscopy. The laser line width decreased almost linearly from 0.35 cm^{-1} to 0.12 cm^{-1} , when the driving pulse width decreased from 100 ns to 10 ns. Experimental results show that the driver is able to output stable narrow pulses, which is suitable for narrow line width driving of QCLs and their applications.

Key words: quantum cascade laser(QCL); line width; pulse driving circuit; LED driver

0 引言

脉冲量子级联激光器(QCL)因其近室温操作和单模连续调谐等优点,逐渐成为理想的高分辨率中红外光源,在气体检测、医疗、化学、石油冶炼等众多领域有着广泛的潜在应用^[1-3]。在基于脉冲量子级联激光器的应用系统中,驱动电路的脉冲宽度决定激光器的线宽^[4],从而会影响气体探测的灵敏度^[5]。因此,研究窄脉冲量子级联激光器的驱动电路对于加速激光器的应用推广,具有重要的研究价值和应用前景。

针对目前存在的脉冲量子级联激光器驱动技术的优缺点,文中研究在传统脉冲恒流驱动技术的基础上,通过理论分析和模型仿真,采用频率补偿的方法,设计了一款稳定的纳秒级激光器驱动电路。在详细分析补偿参数与脉冲质量的关系之后,给出了驱动电路的测量结果和结论。

1 传统的脉冲恒流驱动技术

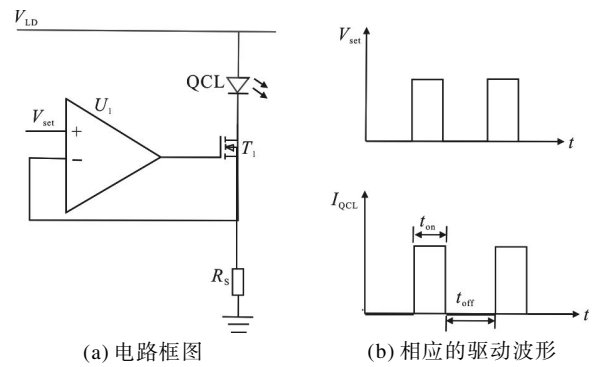
与 LED 类似,脉冲量子级联激光器是电流驱动的器件,输出光强随驱动电流变化而变化,因此脉冲量子级联激光器驱动电路的本质是脉冲恒流源电路^[6-9]。传统的脉冲量子级联激光器驱动技术有两种:一种是基于运放的恒流驱动^[9],另一种是脉宽调制(PWM)驱动技术^[10]。

基于运放的恒流驱动电路如图 1 所示^[9],流过 QCL 负载的峰值电流可计算为:

$$I_{QCL} = \frac{V_{set}}{R_s} \quad (1)$$

当改变输入信号 V_{set} 的峰值电压时,流过负载的峰值电流随之改变,这种恒流源的优点是幅度可精确调节。但由于采样电阻比较小,输入信号微小的波动会引起较大的电流波动^[9]。而且,高速脉冲需要反馈系统具有很高的带宽,在高频下,系统受寄生

参数影响大,很容易形成自激或振荡^[11-12],严重时会造成烧毁激光器,这对价格高昂的量子级联激光器是一种极大的威胁。

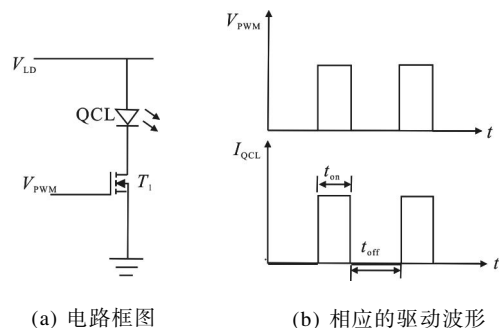


(a) Schematics of driving circuit (b) Input and corresponding output waveforms

图 1 基于运放的脉冲恒流驱动技术

Fig. 1 Conventional pulse constant current driving technique based on operational amplifier

PWM 驱动技术的电路结构如图 2 所示, V_{LD} 是激光器负载工作电压, V_{PWM} 信号通过控制 MOSFET T_1 的开启和关闭,来控制流过 QCL 的电流。峰值电流由 V_{PWM} 信号的高电平幅度、 T_1 以及 V_{LD} 共同决定。由于没有反馈回路,负载支路电阻也比较小,流过负载的电流不仅受 MOSFET 以及负载内阻影响,更受电源电压影响,因此这种技术不是严



(a) Schematics of driving circuit (b) Input and corresponding output waveforms

图 2 PWM 脉冲恒流驱动技术

Fig. 2 PWM-mode pulse constant current driving technique

格的恒流源电路。但这种电路结构简单,在对恒流要求不高的场合,可以实现更窄脉宽的驱动。

综合以上分析,可以发现当使用基于运放的恒流驱动来实现窄脉冲时,电路容易振荡或者过冲,信号完整性差;当使用 PWM 技术来驱动激光器时,虽然可以实现窄脉冲驱动,但此电路并非真正的脉冲恒流驱动,峰值电流难以精确控制。对于分布反馈(DFB)QCL 激光器,由于驱动电流对波长的调制作用,此电流的漂移会导致谱线失锁。因此这种驱动方式也不适用高灵敏度气体吸收光谱检测应用。

针对脉冲量子级联激光器,脉宽为 5~15 ns 的脉冲电流可以获得傅里叶变换极限线宽^[4]。但目前商用的 QCL 驱动器满足不了这个要求。如瑞士 AlpesLasers 的 QCL 驱动器最短脉冲为 22 ns^[13],由于采用 PWM 驱动技术,没有电流反馈机制,容易受寄生参数影响,信号完整性不好。美国 ILX Lightwave 的产品虽然采用了恒流驱动模式与 PWM 驱动技术相结合的方式,但其最短脉冲只达到 25 ns^[14],且脉冲电流信号欠冲严重。

2 驱动电路设计

脉冲电流驱动电路的功能框图如图 3 所示。包括 AC-DC 转换电路、电源产生电路、脉冲产生电路、基于运放的反馈电路和主控支路等模块。

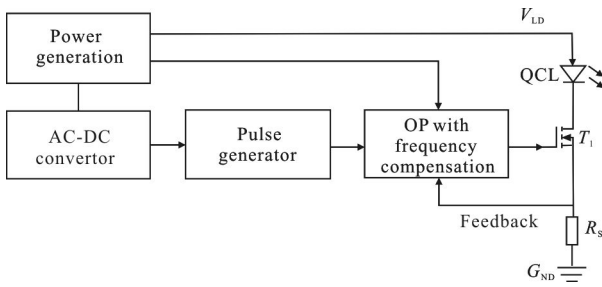


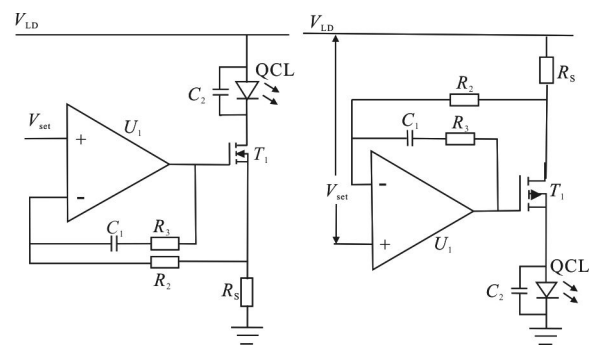
图 3 QCL 驱动系统框图

Fig.3 Block diagram of the proposed QCL driver system

通常,运放工作需要正负压供电, V_{LD} 需要独立高压, AC-DC 转换电路的输出不足以给整个电路供电,因此,在 AC-DC 转换电路输出的基础上,需通过电源产生电路,为整个电路系统各模块供电。电源产生电路或采用 LDO 电源控制芯片,或采用 DC-DC 芯片,具体可依据转换效率和电源纹波等需求指标决定。

文中系统的脉冲产生模块依赖于上升时间、脉宽和频率等需求指标,有多种方法可以实现,最直接的方式是由数字逻辑电路来产生相应控制信号^[15],并经幅度调节后直接生成。由于运放输入为高阻,故运放前级应确保寄生电容小,但为提高脉冲幅度的稳定性,也可以增加无源滤波器模块来滤波,提高波形质量。

基于频率补偿的恒流源电路的详细电路如图 4 所示,此电路具有电流可控性以及精确调节性等优点,在实际工程中被广泛应用^[16]。图 4 列举了两种恒流源电路,图 4(a)是负载不接地的驱动电路,图 4(b)是负载接地的驱动电路,这两种驱动电路原理相同,差别仅在于输入信号的参考点不同以及负载的连接形式不同,图 4(a)中的输入信号是相对地信号而言,图 4(b)中的输入信号则是相对 V_{LD} 电源。图 4(a)是在图 1 的基础上,通过增加了反馈电阻 R_2 和反馈支路 C_1 等补偿元件来提高系统的相位裕度。其中,控制信号连接到运算放大器 U_1 的正相输入端,运算放大器的输出端经由 NMOSFET 的源级反馈到运放的负相输入端,构成一闭环的反馈电路。由于运放的输入电阻很大,因此 R_2 两端几乎没有电流,流过负载 QCL 的电流等于流过电阻 R_s 的电流,如公式(1)所示。由于图 4(b)中控制电压是相对电源电压,在控制上增加了难度,因此,系统采用图 4(a)所示的恒流源电路。



(a) 负载不接地的电路框图

(b) 负载接地的电路框图

(a) Schematic representation with QCL not connected to ground

(b) Schematic representation with one terminal of QCL connected to ground

图 4 基于频率补偿的窄脉冲驱动技术

Fig.4 Short pulse current driving technique with frequency compensation

虽然基于运算放大器可以制作性能优良的恒流电路,但若输入的控制电压 V_{set} 是类似脉冲的交流信号时,电路有可能产生自激振荡。为正确分析图 4(a) 电路的频率特性,设负载 QCL 内阻用 R_L , MOSFET T_1 跨导为 g_m , 栅极电压为 V_x , 源极电压为 V_y , 输出电压 V_O , 运放 U_1 同相输入电压为 V_i , 反向输入电压为 V_n , 输入电阻 R_i , 增益为 $a(s)$ 依据基尔霍夫电流定律和欧姆定律,可得到:

$$g_m(V_x - V_y) = \frac{V_y}{R_S} + \frac{V_y - V_n}{R_2} \quad (2)$$

$$V_O = g_m(V_x - V_y) \frac{R_L / C_2 s}{R_L + 1 / C_2 s} \quad (3)$$

$$\frac{(V_i - V_n)a(s) - V_x}{R_L} = \frac{(V_x - V_n)}{R_3 + 1 / C_1 s} \quad (4)$$

$$\frac{V_i - V_n}{R_1} + \frac{V_y - V_n}{R_2} + \frac{V_x - V_n}{R_3 + 1 / C_1 s} = 0 \quad (5)$$

联合公式(2)~(5),电压反馈型运放按照输入阻抗无穷大,输出电阻无穷小来处理,并假定运放增益在设定的带宽内恒定,得到传递函数为:

$$\frac{V_O}{V_i} = \frac{2R_1 + R_2 + (2R_1R_2 + 2R_1R_3 + R_2^2 + R_2R_3)C_1s}{R_1R_2g_m + (R_1R_2R_3g_m + R_1R_2 + R_2^2 + R_1R_2g_m)C_1s} \times \frac{R_Lg_m}{1 + R_LC_{DB}s} \quad (6)$$

从传递函数中可得零极点为:

$$Z_0 = -\frac{2R_1 + R_2}{(2R_1R_2 + 2R_1R_3 + R_2^2 + R_2R_3)C_1} \quad (7)$$

$$P_1 = -R_L C_{DB} \quad (8)$$

$$P_2 = -\frac{R_1R_2g_m}{(R_1R_2R_3g_m + R_1R_2 + R_2^2 + R_1R_2g_m)C_1} \quad (9)$$

选择一高增益的运算放大器,当改变电容 C_2 时,其频率特性如图 5 所示。从图中可以看出,当

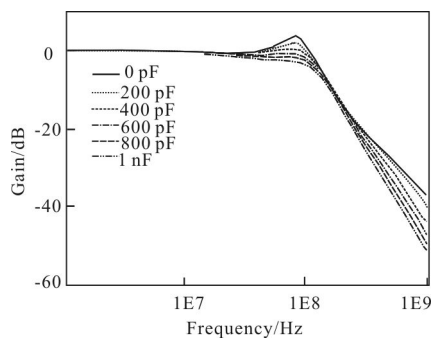


图 5 幅频特性曲线

Fig.5 Curves of amplitude frequency characteristics

$C_2=0$ pF 时,增益随频率的增加先增后变平坦,最后再下降,表示有一个零点和两个极点。随着 C_2 的增加,主极点逐渐与零点相抵消,第二个极点变为主极点,对应的时域特性也比较平坦,如图 6 所示。当补偿电容 C_2 由零慢慢增大时,时域由 12% 过冲到几乎没有过冲。此外,通过 R_2 可调节电路的上升时间,通过 R_3 和 C_1 的调节,可抑制振荡,通过联合调节电阻 R_2 、 R_3 、及 C_1 ,既可获得高速的上升沿,也能保证时域信号的完整性。

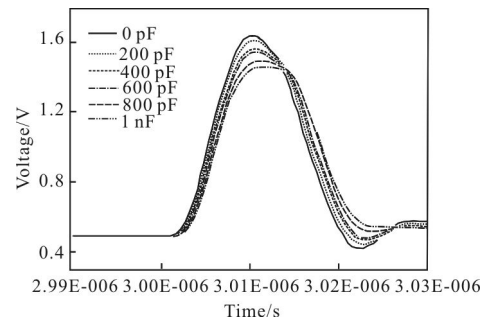


图 6 时域特性曲线

Fig.6 Curves of time domain characteristics

3 测试结果及分析

所设计的 QCL 脉冲驱动器最大峰值电流为 2 A, 脉冲宽度和占空比可调节。可通过更换更大驱动能力的 MOSFET 来提高输出电流能力,测量的详细参数如表 1 所示。

表 1 窄脉冲驱动器参数指标

Tab.1 Specification of the proposed QCL driver with frequency compensation

| Specification | Results | Specification | Results |
|-----------------------------|---------|----------------------|---------|
| Min shortest pulse width/ns | 8.4 | Max peak pulse/A | 2 |
| Rising edge time/ns | 3.54 | Overshoot | <1% |
| Max work frequency/MHz | >10 | Load voltage range/V | ≤20 |
| Max long pulse width/ns | >200 | | |

采用 Tektronix 公司的 DPO70604C 6 GHz 带宽示波器和 4 GHz 带宽的三模探头来测量串联电阻两

端的电压,由于是串联支路,没有分流,采样电阻为贴片电阻,寄生电感可忽略不计,探头直接校准到测试点,寄生特性也可以忽略不计,因此所测试的波形接近真实波形。采用中国科学院半导体研究所研制的中心波长为 $4.6\ \mu\text{m}$ 的量子级联激光器作为负载进行测试,图 7 为实测峰值达到 $1.9\ \text{A}$ 的脉冲电流曲线,上升时间为 $3.54\ \text{ns}$,下降时间为 $3.97\ \text{ns}$,过冲 $<1\%$ 。此外,这些参数也会受到负载电容、引线电感以及测试系统带宽和噪声等因素影响,为提高脉冲质量,连接负载的引线应尽量短以减小寄生特性,负载电容应低于 $10\ \text{nF}$ 。

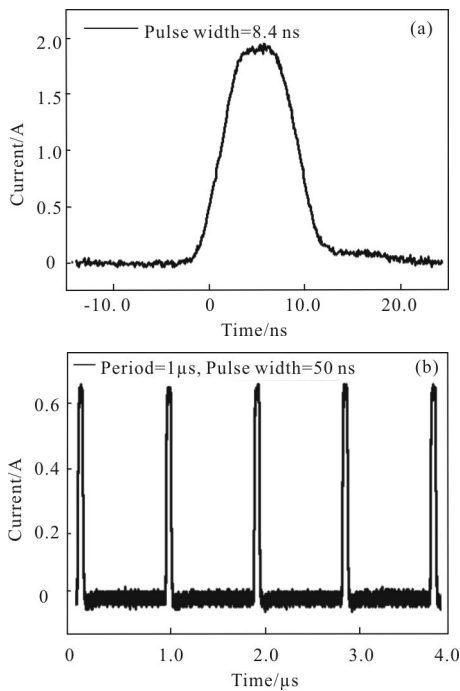


图 7 在 QCL 负载下的单电流脉冲及周期性电流脉冲曲线
Fig.7 Single pulse current curve and periodic pulse current series curve under QCL load

将量子级联激光器输出的光送入德国 Bruke 公司生产的傅里叶光谱仪 V80 中进行线宽测试,频谱分辨率设置为仪器的极限线宽 $0.08\ \text{cm}^{-1}$,当驱动脉宽由 $100\ \text{ns}$ 减小到 $10\ \text{ns}$ 时,激光器线宽由 $0.35\ \text{cm}^{-1}$ 近似线性递减到 $0.12\ \text{cm}^{-1}$,见图 8。从图中可以看出,线宽随驱动器脉冲宽度的减小而下降,但当测量的线宽越接近傅里叶变换光谱仪的极限分辨率时,下降速度变慢,这应是受到傅里叶变换光谱仪分辨率的影响。脉冲量子级联激光器的真实线宽可能会比此测量数据要窄,但是使用同样条件的光谱仪,线

宽随驱动脉宽的变化趋势是正确的。这一现象在参考文献[4,17]中均有报道,与笔者的测试结果一致。

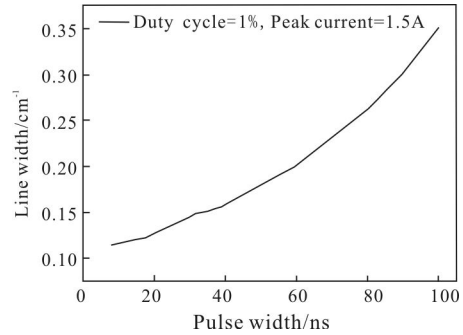


图 8 激光器线宽随驱动电流脉冲宽度的曲线

Fig.8 QCL linewidth dependent on pulse width of pulse current driver

4 结论

文中比较分析了 QCL 驱动设备中传统的基于运放的恒流技术和 PWM 驱动技术,并在分析二者优缺点基础上,通过理论分析和模型仿真,提出了一种基于频率补偿的窄脉冲驱动方法,实测最短脉宽可达到 $8.4\ \text{ns}$,上升沿小于 $4\ \text{ns}$,接近傅里叶变换极限线宽^[4],而且脉冲电流几乎没有过冲或振荡,具有良好的信号完整性。因此,该窄脉冲驱动电路设计合理,技术指标优越,尤其适用于量子级联激光器性能测试及其便携式应用。

参考文献:

- [1] Koster ev A, Wysocki G, Bakhirkin Y, et al. Application of quantum cascade lasers to trace gas analysis [J]. *Applied Physics B-Lasers and Optics*, 2008, 90(2): 165-176.
- [2] Ren W, Farooq A, Davidson D F, et al. CO concentration and temperature sensor for combustion gases using quantum-cascade laser absorption near $4.7\ \mu\text{m}$ [J]. *Applied Physics B-Lasers and Optics*, 2012, 107(3): 849-860.
- [3] Namjou K, Cai S, Whittaker E A. Sensitive absorption spectroscopy with a room-temperature distributed-feedback quantum-cascade laser[J]. *Optics Letters*, 1998, 23(3): 219-221.
- [4] Manne J. Trace gas sensing with pulsed, distributed feedback quantum cascade laser [D]. Alberta: University of Alberta, 2009.
- [5] Sandip P, Ozanyan K B, McCann H. A spectroscopic study for detection of carbon-monoxide using mid-infrared techniques for single-pass measurement [C]// Third International Conference on Optical and Laser Diagnostics, 2007: 012020.

- [6] Lu Kai, Liu Baiyu, Bai Yonglin, et al. High power laser diode drive power supply[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(10): 2680–2684. (in Chinese)
卢凯, 刘百玉, 白永林, 等. 大功率半导体激光器驱动电源的设计[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(10): 2680–2684.
- [7] Wang Jinhua, Yao Hongbao, Liu Zixing. Analysis of laser emitting circuit with high-power and short-pulse [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, 39(6): 1049–1054. (in Chinese)
王金华, 姚宏宝, 刘子星. 高功率窄脉冲激光发射电路分析[J]. 红外与激光工程, 2010, 39(6): 1049–1054.
- [8] Yu Zhaoan, Lv Tieliang, Yao Zhihong, et al. Model and simulation of driving circuits in pulsed quantum cascade lasers [J]. *Opt Precision Eng*, 2013, 21(S): 120–127. (in Chinese)
余兆安, 吕铁良, 姚志宏, 等. 脉冲量子级联激光器驱动电路建模及仿真[J]. 光学精密工程, 2013, 21(增): 120–127.
- [9] Lin M S, Chen C L. An LED driver with pulse current driving technique[J]. *IEEE Trans Power Electron*, 2012, 27(11): 4594–4601.
- [10] Lun W K, Loo K H, Siew-Chong Tan, et al. Bilevel current driving technique for LEDs [J]. *IEEE Trans Power Electron*, 2009, 24(12): 2920–2932.
- [11] Carter B, Brown T R. Handbook of Operational Amplifier Applications[M]. US: Texas Instruments, 2001.
- [12] Franco S. Design with Operational Amplifiers and Analog Integrated Circuits[M]. New York: McGraw-Hill, 1988.
- [13] Alpes Lasers. Quantum cascade laser user's manual [DB/OL]. [2015-02-11]. <http://www.alpeslasers.ch>.
- [14] LDP-3830 independent current limit[DB/OL]. [2015-01-10]. http://www.newport.com/Pulsed-Lased-Diode-Driver,-LDP-3830/1013450/1033/info.aspx#tab_Literature.
- [15] Zhang Xingliang, Guo Lihong, Zhang Chuansheng, et al. Design of high-voltage pulse trigger system for CO₂ laser [J]. *Chinese Optics*, 2012, 5(4): 416–422. (in Chinese)
张兴亮, 郭立红, 张传胜, 等. CO₂ 激光器高压脉冲触发系统的设计[J]. 中国光学, 2012, 5(4): 416–422.
- [16] [日] Michio Okamura. OP Amplifier Circuit Design[M]. Translated by Wang Ling, Xu Yazhen, Li Wuping. Beijing: Science Press, 2004. (in Chinese)
[日] 冈村迪夫. OP 放大电路设计[M]. 王玲, 徐雅珍, 李武平, 译. 北京: 科学出版社, 2004.
- [17] Lytkine A, Manne J, Jager W, et al. Characterization of a 10.3 μm pulsed DFB quantum cascade laser [J]. *Spectrochimica Acta Part A*, 2006, 63(5): 947–951.