

# 低功耗紫外光能量计的研究与设计

王 军<sup>1,3</sup>, 韩 力<sup>1</sup>, 杜博军<sup>2</sup>, 杨会玲<sup>1,3\*</sup>, 何 昕<sup>3</sup>

<sup>1</sup>苏州科技大学虚拟现实智能交互及应用技术重点实验室, 江苏 苏州 215009;

<sup>2</sup>中国白城兵器试验中心, 吉林 白城 137000;

<sup>3</sup>中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033

**摘要** 为解决传统紫外光能量计所存在的功耗大、成本高、精度低以及设计复杂等问题, 提出一种基于双补偿机制的电流积分型低功耗紫外能量检测方案。该方案利用低功耗单片机实现对紫外光能量的计算; 紫外光电探测器输出的电流通过电流积分模块转换为方波脉冲; 放电补偿电路和环境光补偿电路对电流积分模块进行误差校正, 提高检测精度; 主控制器对脉冲数进行统计, 计算能量大小; 充分利用低功耗模式优化显示程序, 显示程序不使用芯片驱动, 而是采用微处理器直接驱动, 使显示程序的功耗进一步降低。实验证明: 该方案功耗不超过165  $\mu\text{W}$ , 对紫外光能量值的检测误差小于1%, 电路复杂度低, 使用芯片成本低, 具有很强的续航能力和很高的实用价值。

**关键词** 测量; 光能量检测; 低功耗; 双补偿; 高精度

中图分类号 TP274 文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP54.101202

## Study and Design of Ultraviolet Energy Meter with Low Power Consumption

Wang Jun<sup>1,3</sup>, Han Li<sup>1</sup>, Du Bojun<sup>2</sup>, Yang Huiling<sup>1,3</sup>, He Xin<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Virtual Reality Key Laboratory of Intelligent Interaction and Application Technology, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou, Jiangsu 215009, China;

<sup>2</sup>Center of Arms Experiment of Baicheng, Baicheng, Jilin 137000, China;

<sup>3</sup>Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China

**Abstract** In order to solve the problems of large power consumption, high cost, low precision and complicated design in the traditional ultraviolet energy meter, a micro-power ultraviolet energy detection scheme based on current-integration with dual-compensation mechanism is proposed. The micro-power microcontroller is used to calculate the ultraviolet energy. The output current of the ultraviolet detector is converted into square wave pulse by the current integration module. The discharge compensation circuit and ambient light compensation circuit are adopted to correct the deviation of the current integration module and improve the detection accuracy. The main controller counts the number of pulses and calculates the energy. The system makes full use of low-power mode to optimize the display program, and the display program is driven by the main controller without driver chip, which further reduces the display power consumption. Experimental results show that the power consumption of this program is less than 165  $\mu\text{W}$ , and the deviation of the ultraviolet energy value is less than 1%. The system with low circuit complexity and low cost of chip has the advantages of strong durability and high practical value.

**Key words** measurement; energy detection; low-power consumption; dual-compensation; high accuracy

**OCIS codes** 120.1880; 120.3930; 120.4630; 230.5170

收稿日期: 2017-04-17; 收到修改稿日期: 2017-05-27

基金项目: 江苏省建设系统科技项目(2016ZD87)、江苏省普通高校研究生科研创新计划(KYZZ16\_0480)、苏州市科技发展计划(重点实验室)(SZS201609)、苏州科技大学研究生创新项目(SKCX16\_043)

作者简介: 王 军(1979—), 男, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事光电测控技术与仪器方面的研究。

E-mail: 281109685@qq.com

\* 通信联系人。E-mail: wjyh@126.com

# 1 引言

现今紫外线(UV)光固化机在工业中的使用频率越来越高,它是一种对工业产品如纸张、聚氯乙烯材料、塑胶材料等使用 UV 油墨喷涂印刷后使油墨快速干固的机器<sup>[1]</sup>。固化灯能量不够高时会导致油墨不干,由于能量是强度随时间的累加值,所以现今普遍使用的 UV 能量计通常是先使用模数转换模块测出光强度,然后将其与时间相乘得出光能量<sup>[2-6]</sup>。随着模数转换芯片的精度和采样速率的提升,这种方式的准确度也在提高,但是此方式仍然存在许多不足之处:UV 光电探测器多为电流型输出,采取模数转换方式且精度要求高必定需要复杂的信号调理电路,而普通精度的模数转换芯片难以达到高精度要求,并且高精度的转换芯片成本很高,电路复杂度高,因此系统功耗难以降低<sup>[7-11]</sup>。

为降低功耗、成本,提高精度,提出一种利用积分方式且带有双补偿机制的低功耗 UV 能量检测方法,不仅满足检测精度和低功耗要求,还大大降低系统复杂度和成本。

## 2 能量检测原理

对能量的检测主要利用电流将电容充电至某一固定值所积累的能量值相同这一原理。对电容  $C$  而言,在  $t$  时刻的电压值为

$$U_c = U(0) + \frac{1}{C} \int_0^t I(t) dt, \quad (1)$$

式中  $U(0)$  为电容充电开始时的电压值。光电二极管的输出电流  $I$  与 UV 功率  $P$  呈正比关系,即  $I = kP$ ,  $k$  为探测器的转换效率,  $P$  为光功率,同时光能量值  $E = \int_0^t P(t) dt$ ,则电容在  $t$  时刻的电压值可以改写为

$$U_c = U(0) + \frac{k}{C} \int_0^t P(t) dt = U(0) + \frac{k}{C} E. \quad (2)$$

当  $U_c > U_{th}$  ( $U_{th}$  为施密特触发器阈值)时,施密特触发器输出反转,使得单稳态触发器收到上升沿触发信号,从而输出一个固定时长的高电平脉冲,同时启动放电回路,放电脉冲过后,电容再次进入充电状态,如此反复。由(2)式可知,当  $U_c$  和  $U(0)$  固定时,电容每次从初始态充电至  $U_{th}$  所接收光能量  $E$  相同,因此通过统计充电的次数即可计算出 UV 能量的数值。

## 3 能量检测实现方案

### 3.1 系统结构

低功耗 UV 能量检测系统的原理如图 1 所示,主要由 UV 光电探测器、电流积分模块、补偿电路、低功耗单片机(MSP430, TI, 美国)<sup>[12]</sup>、段码液晶(LCD)和驱动电路组成。UV 光电探测器输出的电流信号经电流积分模块转换为脉宽与电流信号强度成正比的脉冲信号,补偿电路则用于对转换过程的误差进行补偿。低功耗 MSP430 单片机通过对接收到的脉冲信号进行分析,可以计算出接收到的 UV 能量,并通过段码 LCD 将结果显示出来。

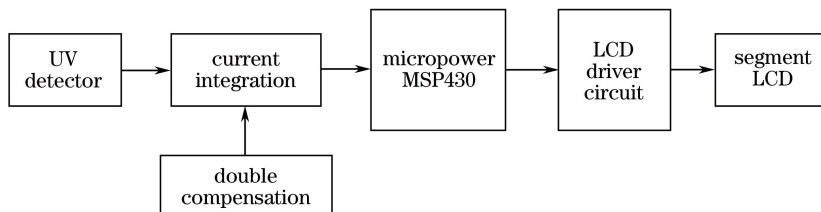


图 1 系统原理框图

Fig. 1 Principle diagram of the system

### 3.2 电流积分模块

电流积分模块整体电路如图 2 所示,UV 光电二极管 D2 输出电流给电容 C1 充电,使 A 点电压逐渐上升,当  $U_A > U_{th}$  时, B 点由低电平变为高电平,触发单稳态触发器,使其在 C 点输出固定时间(此时间由 R3、C3 设置)的高电平触发信号启动放电回路,电容放电后电路恢复为初始状态,继续充电。由于电流大小决定电容充电速度,所以电流的大小与输出脉冲的周期有对应关系,从而实现电流积分。

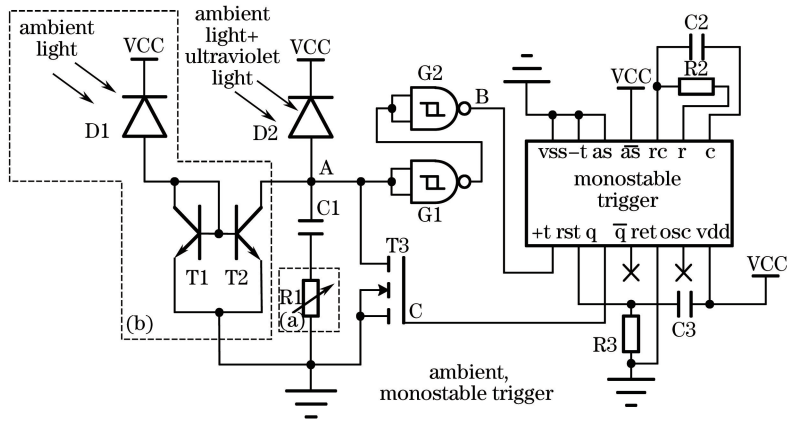


图 2 电流积分模块电路。(a)放电补偿;(b)环境光补偿

Fig. 2 Circuit of current integration module. (a) Discharge compensation; (b) ambient light compensation

### 3.3 放电误差补偿方法

由于在放电过程中,系统不会对 UV 能量进行统计,导致检测不准确,理想状况下放电时间应为无穷小,但实际应用中难以实现此要求,因此需要设计补偿电路。放电补偿电路如图 2 中虚线框(a)所示,放电时间补偿方式是在积分电容后面串联一个可调电阻,调节阻值使单次充电时间减小,充放电时间的总和等于理想状况下的充电时间,从而使统计结果与实际结果近似。加入放电误差补偿电路后输出波形效果对比结果如图 3 所示。

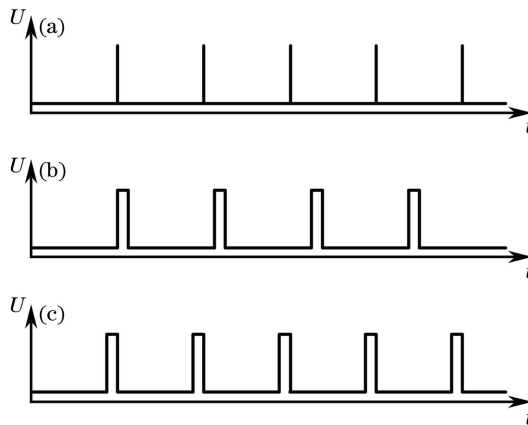


图 3 补偿后波形对比。(a)理想波形;(b)实际波形;(c)补偿波形

Fig. 3 Compensated waveform comparison. (a) Ideal waveform; (b) actual waveform; (c) compensated waveform

理想状况下,放电时间  $t_{\text{dis}} \rightarrow 0$ ,所以放电期间的 UV 光能损耗  $E_{\text{dis}} \rightarrow 0$ ,不加补偿时:

$$E_{\text{act}} = E_{\text{ch}} + E_{\text{dis}} \approx E_{\text{ch}} = \frac{C_1}{k} [U_{\text{th}} - U(0)], \quad (3)$$

式中  $E_{\text{act}}$  为理想状况一个周期的 UV 能量,  $E_{\text{ch}}$  为理想状况电容充电过程的 UV 能量。但实际电路中,放电时间  $t_{\text{dis}}$  无法做到无穷小,这就会导致放电能量损耗  $E_{\text{dis}}$  过大,引起误差,因此设计串联电阻进行补偿,分析电路可得:

$$U_{\text{th}} = U(0) + \frac{1}{C_1} \int_{t_{\text{ch}0}}' kP(t'_{\text{ch}}) dt'_{\text{ch}} + kP(t'_{\text{ch}}) R_1, \quad (4)$$

对(4)式进行整理,得出补偿后充电过程中的 UV 能量为

$$E'_{\text{ch}} = \frac{C_1}{k} [U_{\text{th}} - U(0)] - P(t'_{\text{ch}}) R_1 C_1, \quad (5)$$

应用中 UV 变化速度缓慢,在极短的放电过程中可认为  $P(t'_{\text{ch}})$  为恒定值,所以得到放电过程中的 UV

能量为

$$E'_{\text{dis}} = P(t'_{\text{ch}}) t_{\text{dis}}, \quad (6)$$

式中  $t'_{\text{ch}}$  为引入补偿后的充电时间,  $P$  为光功率。放电时间由单稳态触发器产生, 为固定值, 故放电时间  $t_{\text{dis}}$  已知且固定, 调节  $R_1$ , 使得  $R_1 C_1 = t_{\text{dis}}$ , 可以得出:

$$E_{\text{comp}} = E'_{\text{ch}} + E'_{\text{ch}} = \frac{C_1}{k} [U_{\text{th}} - U(0)] = E_{\text{act}}, \quad (7)$$

式中  $E_{\text{comp}}$  为加入补偿后的单周期实际的 UV 能量, 补偿后, 与理想状况下的  $E_{\text{act}}$  相等, 有效地减小了误差, 提高了精度。

### 3.4 环境光补偿方法

由于 UV 光电二极管敏感波长区间较宽, 且环境光中也包含敏感波长的光, 因此:

$$P_{\text{act}} = P_{\text{sig}} + P_{\text{env}}, \quad (8)$$

式中  $P_{\text{act}}$  为光电二极管接收到的总光功率,  $P_{\text{sig}}$  为被测 UV 功率,  $P_{\text{env}}$  为环境中的干扰光功率。同时 UV 光电二极管自身的暗电流也会附加到输出中, 即:

$$I_2 = I_{\text{ph}} + I_{\text{d}} = kP_{\text{act}} + I_{\text{d}}, \quad (9)$$

式中  $I_2$  为光电二极管的输出电流,  $I_{\text{ph}}$  为光生电流,  $I_{\text{d}}$  为暗电流。所以环境光补偿电路可用于排除此类因素对精度的影响。环境光补偿电路如图 2 中虚线框(b)所示, D1 只接收环境光, 与三极管构成镜像电流源, 其等效电路如图 4 所示, 其值为

$$I_1 = kP_{\text{env}} + I_{\text{d}}, \quad (10)$$

式中  $I_1$  为 D1 的输出电流, D2 为 UV 检测入口, 输出电流为

$$I_2 = kP_{\text{sig}} + kP_{\text{env}} + I_{\text{d}}, \quad (11)$$

则增加该补偿后最终输出电流和紫外光功率成线性关系, 即最终输出电流为

$$I_{\text{out}} = I_2 - I_1 = kP_{\text{sig}}. \quad (12)$$

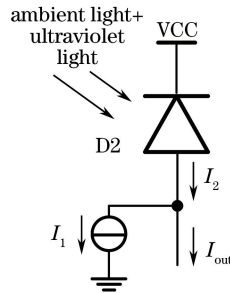


图 4 环境光消除等效电路

Fig. 4 Equivalent circuit of ambient light elimination

### 3.5 段码 LCD 驱动电路设计

检测结果使用 6 位 8 字段码 LCD 显示。为进一步降低显示功耗, 设计了由单片机直接驱动段码 LCD 的电路, 而不使用通用的段码 LCD 驱动芯片<sup>[13]</sup>。整体驱动电路如图 5(a)所示, 驱动方式采用 1/4 复用, 1/3 偏压。但单片机单个输入输出 (IO) 口无法输出 4 种电压, 因此采用两个 IO 口串联 1, 2 MΩ 电阻分压来共同实现, 实现原理如图 5(b)所示。IO1、IO2 取值为 00、01、10、11 分别对应 0、1/3、2/3、1, 以此实现 1/3 偏压。公共端 COM1~4 以及扫描端 SEG 的驱动波形如图 6 所示。

## 4 低功耗软件流程优化

MSP430 单片机工作状态电流约为 200 μA, 为进一步降低功耗, 在软件流程中增加进入低功耗模式步骤, 通过定时器中断或外部中断来唤醒。MSP430 单片机有 5 种低功耗模式 (LPM0~LPM4), 其中 LPM4 模式功耗最小, 但 LPM4 模式下所有时钟均关闭, 只能通过外部中断唤醒, 定时器无法启用, 因此选用 LPM3 模式, 仅打开内部低功耗时钟 ACLK, 消耗电流仅为 0.7 μA。所以定时器初始化时需将默认时钟修改为 ACLK。

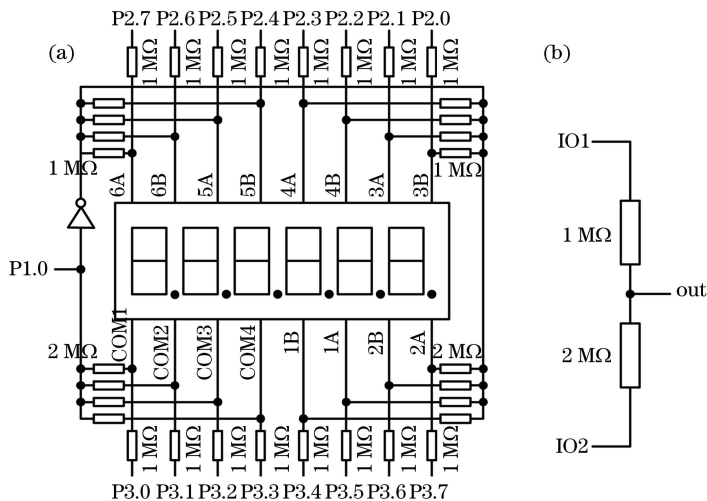


图 5 段码 LCD 驱动电路。(a)整体电路;(b)基本原理

Fig. 5 Circuit of segment LCD driver. (a) Overall circuit; (b) fundamental principle

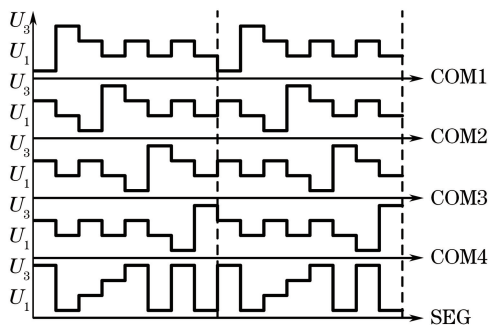


图 6 驱动波形

Fig. 6 Drive waveform

由于显示数据刷新消耗时间较长,而外部中断无法打断定时器中断服务程序,若显示数据刷新过程中出现外部中断则会导致能量值丢失。因此软件将显示数据刷新过程放于主程序中执行,定时器中断仅置位对应中断标志并且退出低功耗模式。此过程提高了中断的执行效率,有效减小了两中断冲突的可能性。主程序流程如图 7 所示,两个中断服务函数如图 8 所示。

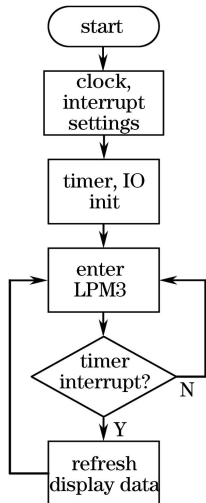


图 7 主程序流程图

Fig. 7 Flow chart of main program

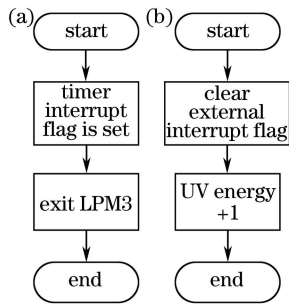


图 8 中断服务函数

Fig. 8 Interrupt service functions

## 5 实验结果

实验中设置  $C_1 = 30 \text{ nF}$ , 可变电阻  $R_1 = 50 \Omega$ , 放电时间为  $1.5 \mu\text{s}$ , 电源电压为  $3.6 \text{ V}$ 。通过测量单稳态触发器输出的脉冲周期来判断测量的误差。实验数据如表 1 所示, 实验中由于电容的实际大小与理论值有微小偏差, 使得单周期测量的光能量与理论值有一定偏差, 但偏差值固定, 此偏差可通过标定进行调整。在总开关处测得整个装置的电流, 在  $35 \sim 46 \mu\text{A}$  范围内摆动。

表 1 实验数据表

Table 1 Experimental data

| UV power /<br>( $\text{mW} \cdot \text{cm}^{-2}$ ) | Cycle / $\mu\text{s}$ |                |       | UV energy / ( $\text{mJ} \cdot \text{cm}^{-2}$ ) |                     | Deviation / % |
|--|-----------------------|----------------|-------|--|---------------------|---------------|
|  | Theoretical value     | Measured value |       | Theoretical value                                | Measured value      |               |
|  |                       | Max            | Min   |  |                     |               |
| 50   | 3680                  | 3444           | 3438  | 0.184  | $0.1720 \pm 0.0002$ | 0.12          |
| 100  | 1840                  | 1721           | 1717  | 0.184  | $0.1720 \pm 0.0003$ | 0.17          |
| 500  | 368                   | 345.6          | 342.8 | 0.184  | $0.1720 \pm 0.0008$ | 0.47          |
| 1000   | 184                   | 172.1          | 170.9 | 0.184  | $0.1720 \pm 0.0011$ | 0.64          |
| 5000   | 36.8                  | 34.72          | 34.04 | 0.184  | $0.1720 \pm 0.0018$ | 1.05          |

## 6 结 论

所设计的紫外光能量计在功耗、成本、精度和电路的结构复杂度等方面进行了较大的优化。以  $3.6 \text{ V}$ 、 $400 \text{ mAh}$  电池供电, 续航时间长达 1 年之久; 采用电流转脉冲方式测量光能量, 避免了模数转换过程, 降低了成本并且简化了电路的结构; 设计了两种补偿电路, 提高检测的精度。实验结果证明: 电源电压为  $3.6 \text{ V}$  时, 功耗仅为  $165 \mu\text{W}$ ; 在紫外光功率不超过  $5 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$  时, 误差在 1% 以内, 且紫外光功率越小, 精度越高; 整个装置使用的芯片较少, 降低了成本。

## 参 考 文 献

- [1] Zhou Ruihua, Tian Xiuyun. Research on UV LED source system for CD painting ink coatingcuring[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(9): 092203.  
周瑞华, 田秀云. 光盘油墨涂层固化的 UV LED 光源系统研究[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(9): 092203.
- [2] Zhou Yujiao, Ren Kan, Qian Weixian, *et al.* Noise analysis of photoelectric detection circuit based on photodiode reverse bias[J]. Infrared and Laser Engineering, 2016, 45(1): 0117003.  
周玉蛟, 任侃, 钱惟贤, 等. 基于光电二极管反偏的光电检测电路的噪声分析[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(1): 0117003.
- [3] Zheng Peichao, Yu Bin, Liu Keming, *et al.* Design of silicon photodiode photoelectric detection circuit[J]. Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications (Natural Science Edition), 2013, 25(4): 484-488.  
郑培超, 于斌, 刘克铭, 等. 硅光二极管光电检测电路的研究与设计[J]. 重庆邮电大学学报(自然科学版), 2013, 25(4): 484-488.



- [4] Li Jingnan, Bao Aida, Qin Li. Laser power measurement method based on high performance black silicon MEMS thermopile power meter[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(11): 112501.  
李竞男, 鲍爱达, 秦丽. 基于高性能黑硅 MEMS 热电堆的激光功率测试方法[J]. *激光与光电子学进展*, 2016, 53(11): 112501.
- [5] Li Wenbin, Zhang Zhuo, Fan Cien, *et al.* Design and implementation of flame detection system based on ultraviolet sensor and infrared sensor[J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2015, 3: 56-59.  
李文斌, 张卓, 范赐恩, 等. 基于紫红外传感器的火焰探测系统设计与实现[J]. *仪表技术与传感器*, 2015, 3: 56-59.
- [6] Lou Junbo, Xi Dali, Li Yongqing, *et al.* Optical fiber sensor photoelectric detection noise analysis and circuit implement[J]. *Optical Communication Technology*, 2013, 37(2): 25-27.  
娄俊波, 习大力, 李永清, 等. 光纤传感光电检测的噪声分析与电路实现[J]. *光通信技术*, 2013, 37(2): 25-27.
- [7] Xiao Nali. Application of photoelectric conversion circuit in stopwatch verification instrument[J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2014, 6: 37-38.  
肖娜丽. 基于光电转换电路的检定系统在秒表检定仪检定中的应用[J]. *仪表技术与传感器*, 2014, 6: 37-38.
- [8] Xiao Shaorong, Shi Liufeng, Huang Biao. Effect of photodetector reverse bias voltage on visibility measurement uncertainty[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, 52(7): 071206.  
肖韶荣, 石刘峰, 黄彪. 光电探测器反向偏置电压对能见度测量不确定度的影响[J]. *激光与光电子学进展*, 2015, 52(7): 071206.
- [9] Xu Hongyu, Zhao Hang, Sun Yanchao. Design of real-time monitoring optical power system based on STM32[J]. *Electronic Science and Technology*, 2014, 27(12): 85-89.  
徐宏宇, 赵行, 孙彦超. 基于 STM32 的光功率实时监测系统设计与实现[J]. *电子科技*, 2014, 27(12): 85-89.
- [10] Liu Jian, Liu Hui, Zhao Weiqiang, *et al.* Impact of distance between detector and LED on measurement of averaged LED intensity[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(9): 0912001.  
刘建, 刘慧, 赵伟强, 等. 测量距离对发光二极管平均发光强度的影响[J]. *光学学报*, 2015, 35(9): 0912001.
- [11] Jiang Shaojun, He Yinghao, Ma Yu. Design of flame detector based on ultraviolet photodiode[J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2013, 2: 34-35.  
姜绍君, 何英昊, 马彧. 基于紫外光电二极管的火焰探测器[J]. *仪表技术与传感器*, 2013, 2: 34-35.
- [12] Hu Xiaoling, Xu Kejun, Fang Min, *et al.* Development of experimental equipment for ultra-low power MCU MSP430F6736[J]. *Research and Exploration in Laboratory*, 2014, 33(1): 69-72.  
胡小玲, 徐科军, 方敏, 等. 一种超低功耗单片机 MSP430F6736 实验装置研制[J]. *实验室研究与探索*, 2014, 33(1): 69-72.
- [13] Lin Fanqiang, Ma Xiaoming. Driver design of segment-type liquid crystal display[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2012, 27(4): 523-528.  
林凡强, 马晓茗. 笔段式 LCD 驱动设计[J]. *液晶与显示*, 2012, 27(4): 523-528.