

# 基于 STM32 的光功率计的设计

姚志红 宋寿鹏 胡晓婷

(1. 江苏大学机械工程学院 镇江 212013; 2. 江苏大学测控与技术研究所 镇江 212013)

**摘要:** 介绍了一种基于 STM32 的高精度光功率计的设计原理和实现方法, 给出其数据处理和修正方法。该光功率计以 STM32 为微控制器, 使用 InGaAs-PIN 光电探测器来实现光电转换, 并利用低噪声光电放大器 AD795 和高速多路模拟开关 MAX4051 搭建电路以实现测量功率范围内的量程自动切换控制, 不仅可以消除测量时的非线性误差, 还可以提高测量的动态范围和精度。同时, 采用 24 位的模数转换器 ADS1232 来实现高的测量分辨率, 并借助数据处理和修正技术进一步提高测量精度, 减少测量误差。实际测试结果表明: 该光功率计具有成本低、精度高和性能可靠等优点, 可以满足工程应用中光功率测试的需要。

**关键词:** 光功率计; STM32; InGaAs-PIN; 量程自动切换

**中图分类号:** TH741 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.8040

## Design of optical power meter based on STM32

Yao Zhihong Song Shoupeng Hu Xiaoting

(1. School of Mechanical Engineering, Jiang Su University, Zhenjiang 212013, China;

2. Institute of measurement and control technology, Jiang Su University, Zhenjiang 212013, China)

**Abstract:** This paper introduced the design principle and realization method of a kind of high precision optical power meter based on STM32, and gave its data processing and correction method. The optical power meter used STM32 as micro-controller, with the use of an InGaAs-PIN photodetector to realize photoelectric conversion, and by the use of a low-noise photoelectric amplifier AD795 and high-speed multi-channel analog switch to build circuit to achieve automatic range switching control in the measurement range of optical power, it can not only eliminated the nonlinear error of measurement, but also can improved the measurement dynamic range and accuracy. At the same time, use a 24-bit ADS1232 ADC to achieve high measurement resolution, and with the help of data processing and modified technology to further improve the measurement accuracy, decrease the measuring error. The actual test results showed: the optical power meter has the advantages of low cost, high precision and reliable performance, can meet the demand of optical power test in engineering application.

**Keywords:** optical power meter; STM32; InGaAs-PIN; automatic range switching

## 1 引言

光功率计是用来测量光功率大小的仪器, 既可用于光功率的直接测量, 也可用于光衰减量的相对测量, 是光纤通信系统中研究、开发和生产以及施工、维修等部门必备的基本测试仪器<sup>[1]</sup>。随着我国光电技术的不断发展, 光功率计在光纤通信、光源测试等领域的应用日益普遍, 需求量也大幅增加<sup>[2]</sup>。针对目前市场上传统的光功率计动态范围小、测试精度低、非线性误差明显、档位切换速度慢等缺点, 设计了一款基于 STM32 的高精度光功率计, 采用先进的大动态波长响应范围的 InGaAs-PIN 光电探测器, 配合使用

ADI 公司的光电前置放大器 AD795, TI 公司的 24 位模数转换器 ADS1232 和美信公司的高速多路模拟开关 MAX4051 进行系统的设计, 利用 STM32 控制放大程增益自动切换技术, 消除光电探测器在同一波长不同光强下对光的非线性响应导致的测量误差, 可以大大提高光功率计测试的精度和可靠性。

## 2 系统工作原理

系统的原理框图如图 1 所示, InGaAs-PIN 光电探测器将检测到光信号转变为电流信号, 进行 I/V(电流电压)变换后输出电压信号, 经过放大和滤波处理后的电压信号送

入 A/D 进行模数转换,根据转换的数据量的大小,利用微处理器判断之后控制放大电路的程控自动切换来获得合适的可供计算的数字量,最后由 STM32 控制器来进行数据的处理和分析,再送入液晶 LCD 进行功率显示,并实现系统的按键控制,数据存储和串口通信等操作。

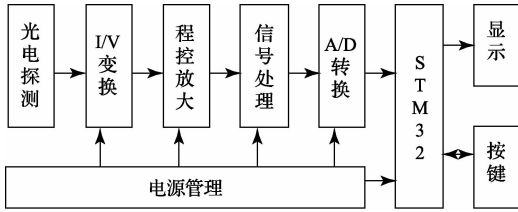
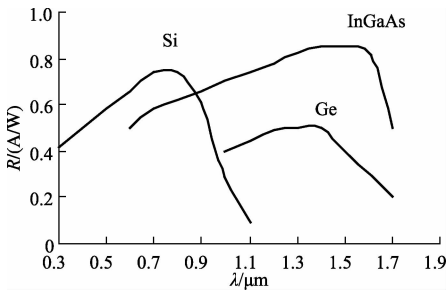


图1 系统原理

### 3 光功率计硬件实现

#### 3.1 InGaAs-PIN 光电探测器

目前流行的光电探测器有 PIN 光电二极管和 APD 雪崩光电二极管,APD 具有很高的检测速度,在高速光电检测应用行业占据主要地位<sup>[3]</sup>,但是其暗电流大,需要很高的偏置电压,噪声也比较大,不适合在精确测量时使用<sup>[4]</sup>。在光功率设计中广泛使用暗电流低、灵敏度高、可以工作在零偏状态的 PIN 光电二极管<sup>[5]</sup>。目前使用的 PIN 管主要由 Si、Ge、InGaAs 等材料制作的,覆盖了从 400~1800 nm 的波长范围。不同材料的 PIN 光电探测器响应度  $R$  和波长  $\lambda$  的关系如图 2 所示<sup>[6]</sup>。

图2 PIN 光电探测器响应度  $R$  和波长  $\lambda$  的关系

绝对响应度是衡量光电探测器性能优越的一个重要指标,决定光电流与光功率之间的关系。响应度公式定义为:一次光生电流  $I_p$  和入射光功率  $P$  的比值。

$$R = I_p / P \quad (1)$$

式中: $R$ 为光电二极管的响应度。

设计的光功率计检测的波长范围在 850~1700 nm,采用 InGaAs-PIN 光电二极管是一个比较理想的选择。InGaAs-PIN 是一种低噪声、高响应的光电检测器,较高的测量灵敏度和很低的暗电流成为首要考虑的因素。设计中选用重庆某公司的光电探测器,其主要的性能指标如表 1 所示。

表1 InGaAs-PIN 光电探测器主要性能参数

参数	波长范围	功率范围	暗电流	响应度	结电容	漏电阻
单位	nm	dBm	pA	A/W	pF	MΩ
数值	850~1700	-70~+6	10	0.85	25	20

#### 3.2 电流电压变换

光电探测器将光信号转变为电流信号,设计前端使用一个 I/V 变换电路采集电流信号,并转换为相应的电压信号,一个电流-电压转换器(I/V 转换器)也称为跨阻放大器<sup>[7]</sup>(transresistance amplifier),它接受一个输入电流  $I$ ,并形成  $V=AI$  的输出电压,这里  $A$  是电路增益,以  $V/A$  计。参照图 3,假设运算放大器是理想的。在虚地节点将电流相加给出  $-I_s + (V-0)/R=0$ ,即:

$$V = RI_s \quad (2)$$

$R$  是电路增益,增益的幅度称为该转换器的灵敏度<sup>[8]</sup>。

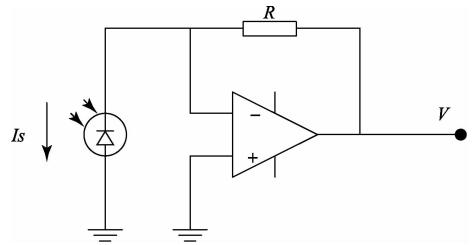


图3 I/V 转换电路

图 3 中光电二极管工作在零偏置电压状态,这种状态称为光电模式,其他可以工作在加反向偏置电压的光电导模式,光电导模式能提供较高的速度,从而更适合高速光脉冲和高速光调制中的应用。光电模式则可提供较低的噪声,更低的暗电流,适合于测量和仪器仪表方面的应用<sup>[9]</sup>。

#### 3.3 程控放大

考虑到采集的光功率信号范围比较大( $nW \sim mW$ ),当放大器增益固定时,会出现小信号无法得到有效放大而降低 A/D 的有效精度,同时由于光电探测器在同一波长的不同光强下对光的响应不是线性的,固定增益测量会出现非线性误差。解决方法是对小信号输入采用高倍放大,对大信号输入采用低倍放大,根据采集到的信号大小,自动改变增益和衰减,切换到合适的量程,即在放大电路中使用量程自动切换技术,在检测范围内将光功率按照光强不同分为八段,每一段对应一个量程,这种技术可以有效消除测量时的非线性误差,在增加测量的动态范围的同时,提高了测量的精度。

在选择多路模拟开关时,主要从通道数、切换速度和导通电阻几个方面进行考虑,考虑到舌簧继电器的切换速度比较慢,选择了半导体多路模拟开关,设计时选用美信公司的 8 路高速模拟开关 MAX4051,但是其

100 Ω 导通电阻比较大,会影响信号的处理,必须想办法消除它的影响。设计中避免从放大器的输出端采样电压,而是通过增加一个多路模拟开关,用它直接采样反馈电阻输出端电压,并送给后级电路处理。如图 4 所示,在这个电路中  $R_1$  和  $R_2$  代表两个多路模拟开关的导通电阻,它们大小相等,  $R_f$  是反馈电阻,  $I_d$  是光电流。分析这个基本电路可知,如果不存在  $R_1$  导通电阻,可以很容易得到  $V_0$  的计算公式为:

$$V_0 = (R_f + R_2)I_d \quad (3)$$

根据放大器输入端的“虚断”原理,放大器的反向输入引脚没有电流流过,而是全部加在反馈电阻  $R_f$  上,那么可以很容易计算出  $V_n$  为:

$$V_n = R_f I_d \quad (4)$$

由式(3)可知,  $V_0$  的计算值中包含了多路模拟开关的导通电阻  $R_2$ , 是一个干扰因素,而  $V_n$  点的电压正是我们希望采样的信号值,故在该节点连接另一个多路模拟开关采集信号,它仍然存在导通电阻  $R_2$ , 但此时  $V_1$  的幅值和  $V_n$  大小相等,即:

$$V_1 = V_n = R_f I_d \quad (5)$$

通过使用两个 MAX4051 的电路设计,可以避免模拟开关导通电阻对功率测量的影响。

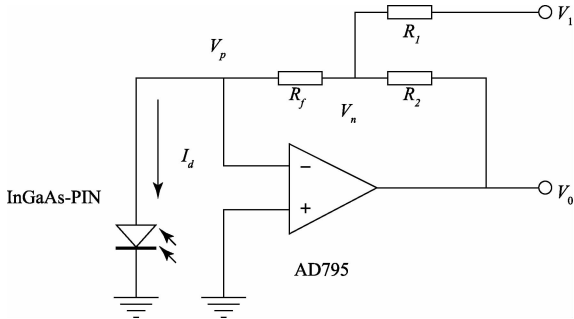


图 4 程控放大原理

低噪声的前置放大器是用来放大探测器输出的微弱电流信号,并实现前后级电路的阻抗匹配<sup>[10]</sup>。在最低光强时需要检测到 100 pA 左右的光电流,这大大降低了可以选用的放大器的范围。意味着放大器必须具有很高的开环增益,同时偏置电流应该保持在 pA 级别,还要具有很好的噪声性能,同时具备以上几点才能保证在最高灵敏度时可以检测到微弱的光电流信号。设计时选用 AD 公司的 AD795 作为光电放大器,超低的噪声,最大 2 pA 的输入偏置电流和 120 dB 的开环增益使其可以满足光电信号的放大要求。光功率计的程控放大电路如图 5 所示。

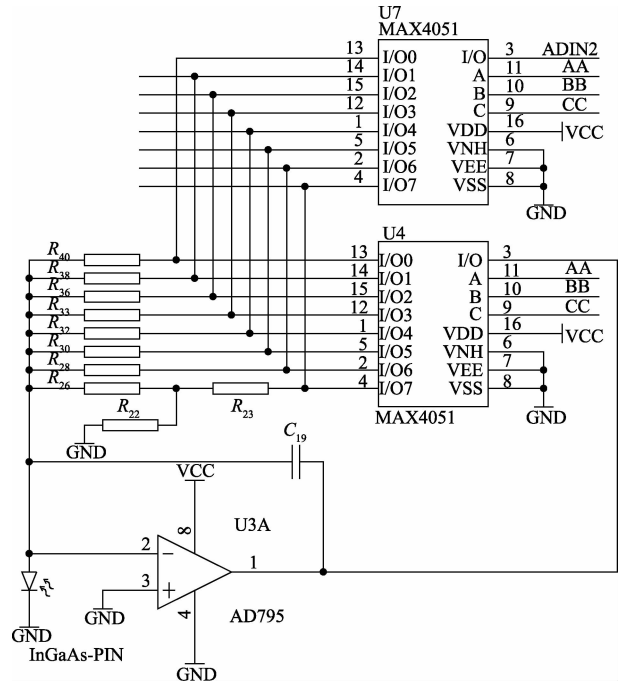


图 5 程控放大电路

### 3.4 A/D 转换设计

经过放大和滤波之后的信号送给 A/D 采集,模拟量转换成数字量,便于单片机进行数据处理。由于入射光稳定,因此对 AD 器件的转换速度要求不高但对精度要求很高,且信号的动态范围很大。设计中为保证光功率计的精度和显示分辨率,选用 TI 的 24 位高精度模拟转换器 ADS1232。ADS1232 采用今年来流行的  $\Sigma-\Delta$  积分转换技术,具有分辨率高、线性度好、成本低等特点,得到了很广泛的应用。A/D 接口电路如图 6 所示。

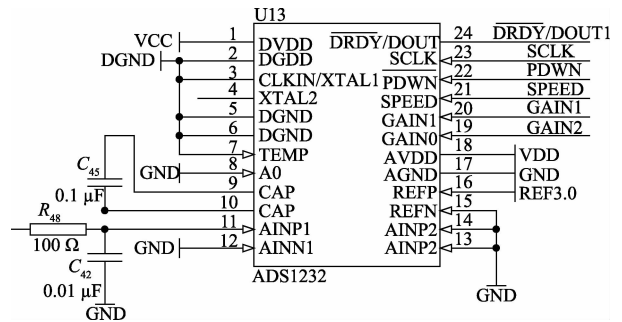


图 6 A/D 接口电路

### 3.5 STM32 控制设计

设计中的控制器是 ST 公司的 STM32 系列微控制器,型号是中等容量的 STM32F103RBT6,STM32 属于 ARM

的Cortex-M3核微处理器,Cortex-M3采用ARM V7构架,不仅支持Thumb-2指令集,而且拥有很多新特性。较之ARM7 TDMI,Cortex-M3拥有更强劲的性能、更高的代码密度、位带操作、可嵌套中断、低成本、低功耗等众多优势<sup>[11]</sup>。高性价比是选择STM32的主要因素,同时其超多的外设和通讯协议支持使以后功能的扩展变得十分方便。本次设计中以STM32为主要控制器,控制的功能包括按键功能控制,串口下载控制,模数转换控制,量程自动切换控制,液晶显示器并口通讯及显示相关控制,I<sup>2</sup>C总线存储通讯控制以及数据的处理和修正控制。

### 3.6 LCD液晶显示及按键设计

本次光功率设计中使用了武汉中显科技的4.3寸的TFT液晶显示屏,通过并口和微控制器通信,显示的界面主要包括开机画面,正常显示界面,单位切换界面,波长切换界面等,正常显示界面又包括通道显示,光功率计数值显示,测试波长显示,测试单位显示。按键控制部分使用了8个按键控制显示屏的相关操作,自行设计制作了一个按键电路板,以方便的控制显示输出,主要包括更改测试波长,相对功率测试,自校准模式,保持当前测试数据,保存当前更改设置,清除暗电流,测试采样时间设置,单位转换设置等8个按键操作。

## 4 系统软件实现

### 4.1 STM32主控制流程

微处理器上电后首先进行初始化,分为系统初始化和显示初始化。系统初始化包括时钟初始化、中断初始化、串口初始化、端口初始化等操作。显示初始化为了设置背景和显示方式。选择默认档位后开始模数转换,等待转换结束后读取A/D转换数据并选择显示波长后送入数据处理模块,进行数据的处理和修正,选择显示单位后,最后送入显示器进行功率值显示。其流程图如图7所示。

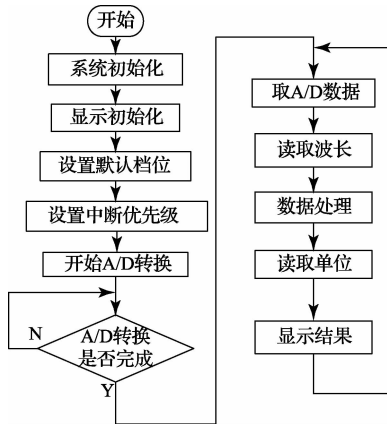


图7 STM32主控流程

### 4.2 自动量程控制流程

由于所要测试的光功率范围比较大,从-70~

+6 dBm,设计中对量程范围进行了8段线性化的分段,大大降低了非线性误差。相邻两个量程的放大倍数相差10倍,即10 dBm划分一次量程,可以划分为8个量程,-70~-6 dBm是最低量程,0~6 dBm是最高量程。量程自动切换的是根据A/D转换后的数字量的大小判断,如果大于设置参数则降低档位,再返回进行判断,直到档位量程合适为止。当转换量小于设置参数时,进行加档控制,直至转换出来的数字量在设置的参数范围以内,再进行下一步的计算和处理。具体流程图如图8所示。

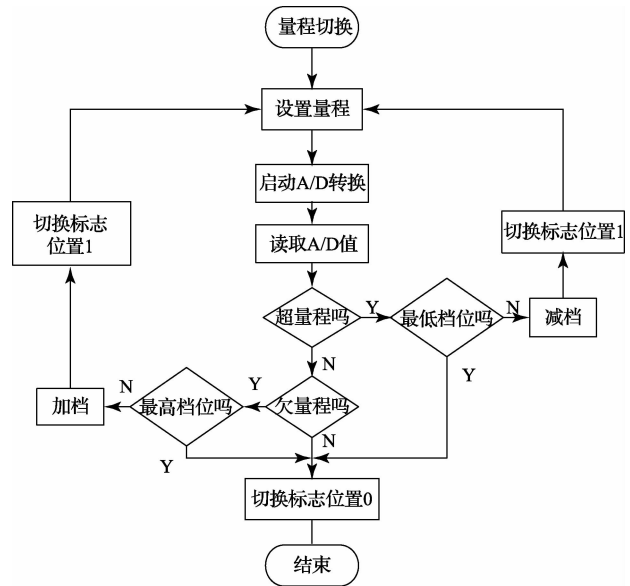


图8 自动量程控制流程

## 5 数据处理和校正

STM32微控制器的数据处理是实现光功率测量的核心部分,这里需要对从模数转换器读取的数字量进行数据处理和修正。首先,为了减少暗电流对测量结果的影响需要进行清除暗电流的处理。然后,选择是否进行数字平均值滤波,以便进一步提高测量数据的精度。接下来,读取被测光的波长用以计算光功率值(单位是dBm),光功率计算方法由以下计算公式给出:

$$P = 10\lg(ADvalue) \quad (6)$$

式中: $P$ 是计算得到的初始光功率值,单位是dBm; $ADvalue$ 是读取的模数转换器数值。

计算得到光功率值是一个初始值,需要进行相关修正和校准才能保证其准确度。光功率值修正的处理方法由下式给出:

$$P_{dBm} = 10\lg(ADvalue) + C + K_1 + K_2 + K_3 \quad (7)$$

式中: $C$ 称为估算校准值,可根据初始光功率值估算得到; $K_1$ 称为小误差校准值,是在估算校准的基础上进一步减少测试误差而进行的校准,一般通过和标准光功率计进行校准得到,其校准原理图如图9所示。

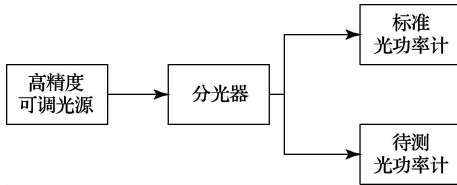


图 9 校准原理

$K_2$  称为增益校准值,由于放大增益不固定而设置,相邻的量程增益相差 10 倍,则增益校准值相差 10 dBm;

$K_3$  称为波长校准值,由于光电探测器对不同波长的光的响应度不同,由此引起的误差需要进行波长校准,主要涉及 1 310 nm 和 1 550 nm 波长。

光功率经过校准后得到了精确的光功率值,需要判断是否超出设计指标的  $-70 \sim +6$  dBm 的测量量程。为了方便按键处理时进行单位的切换,必须根据精确的光功率值计算出以 mW 为单位的光功率值,计算公式如下:

$$P_{\text{dBm}} = 10 \lg \frac{P_{\text{mW}}}{1 \text{mW}} \quad (8)$$

式中:  $P_{\text{mW}}$  是以 mW 为单位的光功率值。

经过上面的数据处理和修正后,可以进一步提高光功率计的测量精度,并减少测量误差。

为了验证搭建的样机是否可以准确的测量光功率值大小,需要对其进行准确度测试,测试的方法根据图 9 的校准原理图进行,测试波长为 1 310 nm,在相应波长下利用可调光源发出的 13 组不同强度的光同时入射进待测样机和标准光功率计,记录两者测试数据进行分析比较,得出该波长下的数据拟合图,如图 10 所示。

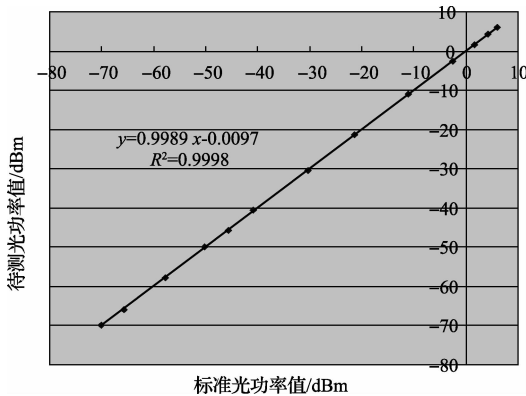


图 10 测试数据拟合度曲线

测试结果表明,样机的测试范围是  $-70 \sim +6$  dBm,显示分辨率 0.01 dBm,1 310 nm 波长下数据拟合度  $R^2$  都十分接近或等于 1,说明该样机的准确度已接近或达到标准光功率计的准确度,可以满足实际光功率测试的需要,根据测试数据计算出光功率计最大不确定度为  $-2.83\%$ ,

而总体设计的预期不确定度要求为  $\pm 3\%$ ,达到了设计的目标。

## 6 结 论

设计了一款基于 STM32 的高精度光功率计,具有精度高,显示分辨率高,动态范围宽等特点,采用自动量程切换技术,在 InGaAs-PIN 光电探测器的整个测量范围内进行了 8 段线性化的处理,极大地提高了功率检测的准确性和可靠性。设计中采用高性能的 InGaAs-PIN 光电探测器、超低偏置的放大器 AD795、高切换速度的模拟转换开关 MAX4051 和高性价比的微控制器 STM32F103RBT6 来实现光功率计的性能。实际测试表明:该光功率计成本低,误差小,维护方便等优点,可满足工程和教学中的功率检测需要,有广泛的应用前景,对高精度光功率的设计有一定的指导意义。

## 参考文献

- [1] 刘增基. 光纤通信[M]. 西安:西安电子科技大学出版社,2004:8-9.
- [2] 王磊. 光纤通信技术现状及发展趋势[J]. 机械管理开发,2006,30(6):45-50.
- [3] 董伟波,王茜茜. 基于虚拟仪器技术的 APD 噪声等效功率测量系统[J]. 仪器仪表学报,2011,32(11):2635-2639.
- [4] 佛朗哥,基于运算放大器和模拟集成电路的电路设计[M]. 刘树棠译. 西安:西安交通大学出版社,2004:52-54.
- [5] 徐波. 一种通用光功率计的实现原理[J]. 电子质量,2006,30(5):3-7.
- [6] 雷玉堂. 光电检测技术[M]. 北京:中国计量出版社,2009:23-28.
- [7] Keiser G. Optical Fiber Communications Third Edition[M]. McGraw-Hill Edition Co. and Publishing House of Electronics Industry,2000:193-197.
- [8] Jerald Graeme. 光电二极管及其放大电路设计[M]. 赖康生译. 北京:科学出版社,2012:90-93.
- [9] 周真,杨军,秦勇. 基于 PIN 光电二极管的光功率计[J]. 仪表技术与传感器,2013(6):43-45.
- [10] 兰羽,张玉洁. 光电探测器中低噪声前置放大器的设计[J]. 国外电子测量技术,2013,32(6):84-86.
- [11] 雷卫亭. 基于 ARM 的高精度激光功率计设计[J]. 电子测量技术,2014,37(4):96-99.

## 作者简介

姚志红,1989 年出生,硕士研究生。研究方向:新型光电检测仪的研究与设计,微弱光电流信号的检测。

E-mail:yaozhihong1989@126.com