

文章编号 1004-924X(2014)02-0304-07

大动态范围闪烁晶体荧光模拟器的设计

项 天¹, 金 西^{1*}, 董家宁¹, 封常青², 刘树彬²

(1. 中国科学技术大学 物理系, 安徽 合肥 230026;
2. 中国科学技术大学 近代物理系, 安徽 合肥 230026)

摘要:针对暗物质粒子探测卫星(DMPES)锗酸铋(BGO)量能器探测单元的标定需要,设计了一种用发光二极管(LED)作为光源的闪烁晶体荧光模拟器。首先,利用光电倍增管(PMT)测量 BGO 晶体在宇宙线辐射下的荧光脉冲,对脉冲波形建模拟合,并将波形存储到可编程信号发生器中。然后,选择一种峰值波长与 BGO 晶体的荧光发射波长相近,且其光通量与工作电流的线性度较好的 LED,设计 LED 驱动电路,令 LED 的工作电流与模拟器输入的模拟电压信号幅度成正比。最后,利用信号发生器输出模拟的 BGO 晶体荧光脉冲波形至驱动电路,使 LED 发光,并利用积分球将 LED 的荧光通过光纤均匀地输出到多个 PMT。实验结果表明:模拟器光脉冲测试结果与对 BGO 晶体实际测试的结果相似,光强覆盖 PMT 的 2,5,8 个打拿极(Dynode)输出,动态范围达 4.11×10^3 倍,满足暗物质粒子探测卫星 BGO 量能器地面检测系统的需求。该荧光模拟器也可用于同类闪烁晶体探测器系统的检测和标定。

关 键 词:暗物质粒子探测卫星;锗酸铋晶体(BGO);模拟器;大动态范围

中图分类号:O572.2;TL814 文献标识码:A doi:10.3788/OPE.20142202.0304

Design of fluorescence simulator with large dynamic range for scintillation crystal

XIANG Tian¹, JIN Xi^{1*}, DONG Jia-ning¹, FENG Chang-qing², LIU Shu-bin²

(1. Department of Physics, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China;

2. Department of Modern Physics, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

* Corresponding author, E-mail: jinxi@ustc.edu.cn

Abstract: A scintillation crystal fluorescence simulator with a large dynamic range was developed based on a Light-emitting Diode (LED) for calibrating the Bismuth Germanium Oxide(BGO) calorimeter detectors of the Dark Matter Particle Explore Satellite(DMPES). Firstly, a Photo Multiplier Tube(PMT) was used to measure the fluorescent pulse of a BGO crystal, create an exponential model for the shape of fluorescence pulse and to store the exponential waveform into a programmable signal generator. To match the feature of BGO, the LED with a similar peak wavelength to the BGO crystal and a good linearity between current and light intensity was chosen, and the LED driver with a output current in proportion to the input voltage signal was designed. Finally, the signal generator output the simulated fluorescence pulse of BGO crystal to the driver and allowed the LED to lighting, then, it transmitted the pulse to PMTs via an integrating sphere with optical fibers. Experiment results show

收稿日期:2013-06-20;修订日期:2013-08-12.

基金项目:中国科学院空间科学战略性先导科技专项资助项目(No. XDA04040202-4)

that the pulse shape from the real BGO is coincident with that from the simulator and the dynamic range of output light intensity covers all three dynodes, which is up to 4.11×10^3 . The simulator satisfies the need of ground-based testing for DMPES BGO detectors and can also be used for other similar scintillation crystal detectors.

Key words: Dark Matter Particle Explore Satellite(DMPES); Bismuth Germanium Oxide(BGO); simulator; large dynamic range

1 引言

暗物质粒子探测卫星(Dark Matter Particle Explore Satellite, DMPES)是我国空间科学战略性先导科技专项之一。该项目计划在 500 km 的卫星轨道上探测高能宇宙线粒子的能谱和空间分布,用来寻找暗物质粒子存在的证据^[1-2]。BGO ($\text{Bi}_2\text{O}_3\text{-GeO}_2$)量能器是暗物质粒子探测卫星的主要探测器之一,其最主要的功能是测量宇宙线粒子的能量。它由 308 根 $2.5\text{ cm} \times 2.5\text{ cm} \times 60\text{ cm}$ 的 BGO 晶体构成,这些晶体叠成一个 14 层的探测器阵列,每层 22 根晶体,在晶体两端安装光电倍增管(Photo Multiplier Tube, PMT),用来收集粒子沉积在 BGO 晶体的能量转换成的荧光。

BGO 晶体是一种闪烁晶体,高能粒子入射时会在 BGO 晶体中沉积能量,这些能量的一部分将以荧光的形式释放,其荧光谱峰值的波长约为 480 nm,且该荧光的光强与入射粒子的沉积能量具有很好的线性关系^[3]。BGO 量能器最终选用的光电器件是 R5611PMT,该型号的 PMT 已应用在 ATIC 实验上^[4]。它具有 1 个光阴极,10 个打拿极(Dynode)和 1 个阳极。来自 BGO 晶体的荧光光子入射到光阴极,激发光电子,受激电子在电场的作用下,依次经过第 1 个打拿极到第 10 个打拿极,并在每个打拿级中获得一定的电流增益,最后从阳极输出放大电流。R5611 PMT 光阴极在 480 nm 波长附近有较好的响应,适用于读出 BGO 晶体^[5]。BGO 量能器中的前端读出电路将 PMT 输出的电流脉冲积分后,得到电荷量。根据各探测器单元信号通道输出的电荷量便可以反推出宇宙线粒子在量能器中的沉积能量。

根据物理需求,暗物质粒子探测卫星的 BGO 量能器所探测的宇宙线粒子能区在 5 GeV ~ 10 TeV,远高于地面加速器所能产生的粒子能量上限。具体到单个 BGO 晶体单元,其能量测

量覆盖 11.5 MeV ~ 2 TeV,即 0.5 MIP ~ 1 MIPs,约 1.8×10^5 倍的动态范围。这里的 MIP 是最小电离粒子穿过 2.5 cm 厚的 BGO 晶体所沉积的能量,约为 23 MeV^[4]。为了实现极宽动态范围的能量测量,BGO 探测器的 PMT 采用了多打拿极读出方案,利用 R5611 的第 2,5,8 打拿极(简称为 DY2、DY5、DY8)进行信号输出。在工程研制过程中,需要检测每个 PMT 的性能,并标定其动态范围。

由于 BGO 量能器要探测的粒子能量高达 10 TeV 量级,用地面加速器很难实现完全的标定,因而采用光强可控的人工光源替代 BGO 晶体产生的闪烁荧光,是一种可行的检测和标定手段。国际上许多高能粒子探测工作组都进行过 PMT 的标定,但多利用简单的电压脉冲驱动 LED 来测试 PMT^[6-8]。由于前端读出电路对不同形状和宽度的探测器信号具有不同的响应,所以简单利用脉冲信号产生器驱动 LED 光源不能实现准确的标定。另外,LED 的输出光强与工作电压的关系是非线性的,简单地利用脉冲信号产生器对 LED 进行驱动,既不利于精确调节信号幅度,也难以产生与探测器荧光脉冲形状相似的光输出,因此设计一种可以真实模拟 BGO 晶体发光特性的光源是非常必要的。

这种光源应具有以下几个特征:

(1)发光器件的发射光谱应与 BGO 晶体的闪烁荧光光谱相近。

(2)发光器件的光辐射功率与通过它的电流呈线性或近似线性,可以通过控制电流来控制它的辐射功率,以实现 BGO 晶体荧光脉冲形状的模拟。

(3)光源控制电路具有将输入电压信号等比例转换为输出电流的能力。最终光源的光辐射功率正比或近似正比于输入电压脉冲信号。

(4)控制电路配合信号源具有大动态范围,能覆盖 PMT 的 2,5,8 打拿极,以验证 PMT 及前端

读出电子学的动态范围。

根据以上特征,本文设计了一种大动态范围闪烁晶体荧光模拟器,它可以真实模拟 BGO 晶体发光,照射 PMT 获得最接近真实情况的测试结果,用于探测器的检测和标定。为了将模拟器的荧光导入 PMT,本文采用了积分球和光纤。积分球作为一种理想的匀光器^[9-11],不仅可以实现多路光纤输出时光强的均匀一致;而且利用 LED 光在积分球内均匀分布的原理,可以将 LED 光输出到多个 PMT,满足在探测器研制阶段批量检测 PMT 的需求。

2 闪烁晶体荧光模拟器的设计

如图 1 所示,闪烁晶体荧光模拟器主要包括信号源、驱动电路、LED 模块和 PC 机。信号源采用泰克公司的 AFG3252 可编程信号发生器。驱动电路驱动 LED 的电流,使它与控制电压成正比。

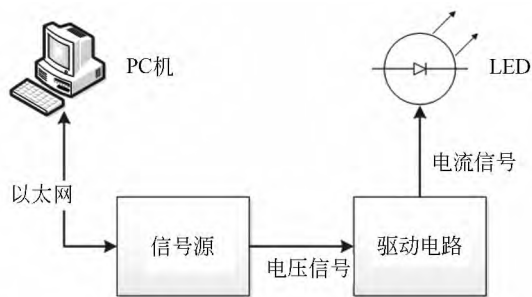


图 1 闪烁晶体荧光模拟器示意图

Fig. 1 Schematic diagram of scintillation crystal glow simulator

2.1 宇宙线 BGO 荧光脉冲的测量和建模

图 2 是宇宙线 BGO 荧光脉冲的测量装置示意图^[12]。图中, HV 为 PMT 的高压, GND 表示高压接地。示波器采用自触发方式,它接收阳极输出的信号。在室内开启测试装置,从示波器中观察到的波形与宇宙线穿过 BGO 晶体时激发的荧光脉冲形状相似。

闪烁体受激后,单位时间内释放的光子数近似可以表示成两个指数过程的组合,一个描述闪烁增长,一个描述衰减^[13]。BGO 晶体的增长时间非常短,且远远小于衰减时间。因此可以将过

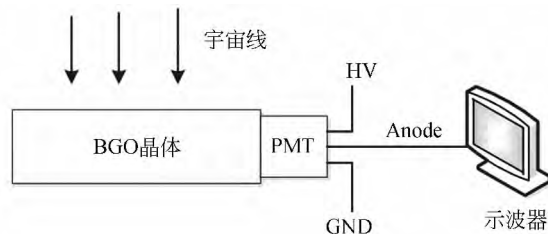


图 2 宇宙线 BGO 荧光脉冲测试装置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of BGO fluorescence pulse test device for cosmic rays

程简化为:

$$I(t) = I_0 e^{-\frac{t}{\tau}}, \quad (1)$$

式中: $I(t)$ 表示单位时间内放出的光子数; τ 表示 $I(t)$ 从 I_0 减小到 $1/e$ 所需的时间。经测试装置拟合得到 τ 为 275 ns, 与 BGO 晶体的荧光衰减时间相当。

2.2 LED 的选择

由文献[5]可知, R5611 在 450~500 nm 的效率相差不大, 故在上述波长进行筛选。采用 SSP6612 型 LED 光色电参数综合测试仪测试 LED 的峰值波长和电流效率(光通量/电流)。经过筛选测试, Optek 公司的 OVLGB0C6B9 型 LED 电流效率的线性度较好, 其峰值波长约为 467 nm, 频谱宽度约为 19 nm, 在 10 mA 正向电流时光通量达 1.89 lm, 与 PMT 和 BGO 晶体的适应性较好。所选 LED 的电流/光通量曲线如图 3 实线所示。图 3 虚线为所选 LED 的发光效率, 从图中可以看出, 随着工作电流的增加, LED 的发光效率的下降速度先较快, 之后趋于平缓。

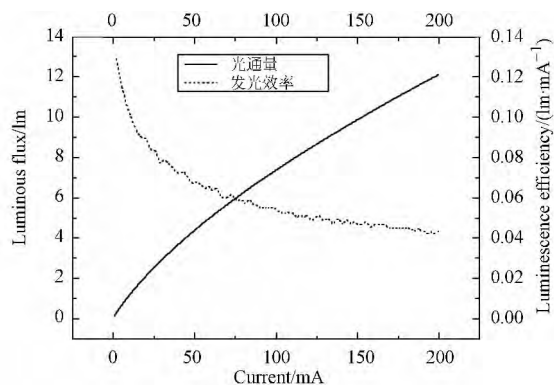


图 3 选用 LED 的电流/光通量曲线

Fig. 3 Current/luminous flux curves of LED

2.3 驱动电路设计

图4是驱动电路的原理图。电阻 R_1 左边为

信号输入,LED D_1 为驱动电路的负载,即模拟器的发光光源。

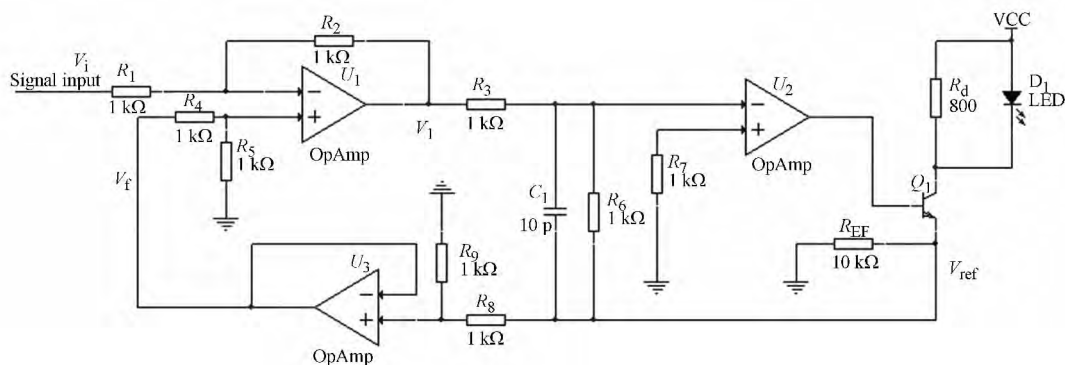


图4 驱动控制电路的原理图

Fig. 4 Schematic diagram of drive control circuit

运放 U_1 及电阻 R_1, R_2, R_4, R_5 构成减法器。输出端电压为:

$$V_1 = V_f - V_i. \quad (2)$$

在 Q_1 的集电极,根据欧姆定律有:

$$V_{ref} = I_E \cdot R_{ref}. \quad (3)$$

运放 U_2 与电阻 R_3, R_6, R_7, C_1 构成倒相反馈电路,有:

$$V_{ref} = -V_1. \quad (4)$$

这个反馈电路与文献[14]中的电路不同,可以避免在输出端形成振荡。

运放 U_3 和电阻 R_8, R_9 组成电压跟随器,有:

$$V_f = \frac{1}{2} V_{ref}. \quad (5)$$

综合式(2)~式(5)可以得到:

$$I_E = \frac{2}{3} \frac{V_i}{R_{ref}}. \quad (6)$$

因此,输出电流与输入电压成正比。

为了提高输入信号动态范围,在图4中光源 D_1 旁边并联分流电阻 R_d 。图5为分流电阻存在的情况下利用Pspice仿真得到的控制电路伏安特性曲线。由于未能得到所选用LED的Pspice模型,在仿真时用其它电参数类似的LED模型替代,所以此处的伏安特性曲线与真实电路曲线可能存在偏差,本文仅作讲解电路原理用,并不影响分析结论。图中,横坐标为模拟器的输入电压 V_i ,左纵坐标为流过 D_1 的电流 I_D ,右纵坐标为 D_1 上的电压 V_{LED} 。

当 V_i 从0增加时, Q_1 的集电极电流 I_E 等比例增加。此时LED尚未开启,电流全部从分压电

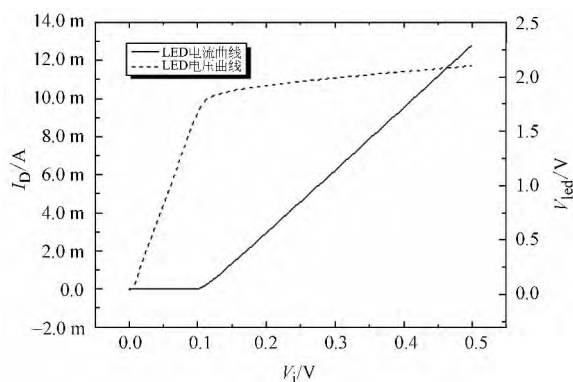


图5 分流电路伏安曲线示意图

Fig. 5 Volt-ampere curves of shunt circuit

阻 R_d 流过,此时有:

$$V_{LED} = I_E \cdot R_d. \quad (7)$$

随着 V_i 继续增加, V_{LED} 等比增大,直到 V_{LED} 达到 D_1 的开启电压。此时, D_1 的电阻 R_L 急剧下降,而分流电阻 R_d 保持不变,电流基本上从 D_1 流过。因此,分流电阻 R_d 的存在相当于为模拟器增加了一个阈值电压。这样可以增加驱动电路对小电压的响应,提高动态范围。

3 实验测试及结果

为了测试闪烁晶体荧光模拟器的性能,本文设计了一套测试装置。测试分为两个部分:第一,利用示波器读取PMT打拿极的输出波形,对比模拟器波形与原始波形的相似度;第二,利用暗物质粒子探测卫星的前端电路(Front End electron-

ics, FEE) 板获取 PMT 第 2, 5, 8 打拿极的输出, 测量模拟器的动态范围和输出的线性度。文献 [15] 证明, FEE 板及所用 PMT 的线性度较好。

3.1 实验装置

图 6 是实验装置示意图。将闪烁晶体荧光模拟器的光源放置在积分球内。积分球直径为 60 mm, 由聚四氟乙烯 (F4) 材料烧结形成均匀漫反射的内表面。在光输出口设置挡光板, 防止一次光入射。用直径为 0.5 mm 的光纤将闪烁光从积分球中引出至 PMT。PMT 的 3 个打拿极分别接示波器和 FEE 板, 为两组测试提供信号。

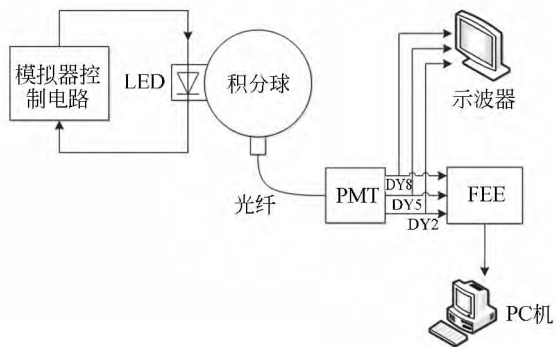


图 6 测试装置示意图

Fig. 6 Scheme of test system

3.2 波形匹配度对比结果

将一根光纤连接至 PMT, 用示波器读取 DY8 的数据, 如图 7 的实线所示。利用图 2 中宇宙射线 BGO 荧光脉冲测量装置测得的波形为虚线。为直观显示, 将两个波形幅度调节至大致相同。对比结果说明, 模拟产生的波形与实际情况相似, 满足需求。

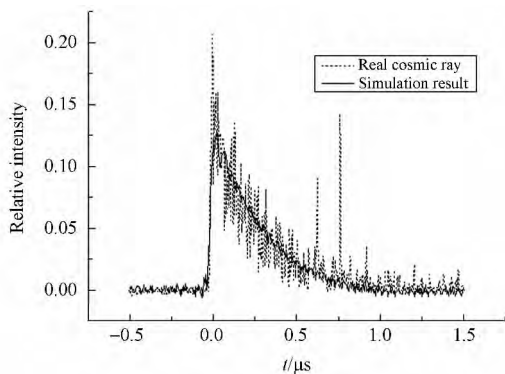
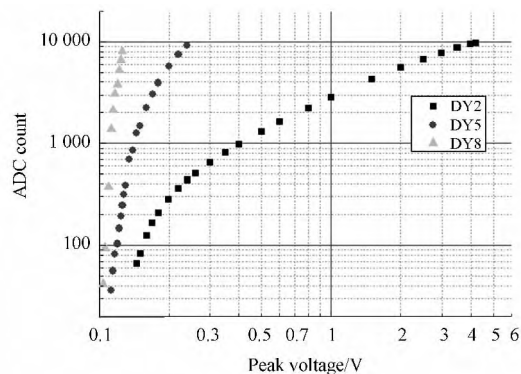


图 7 波形匹配度对比

Fig. 7 Waveform matching

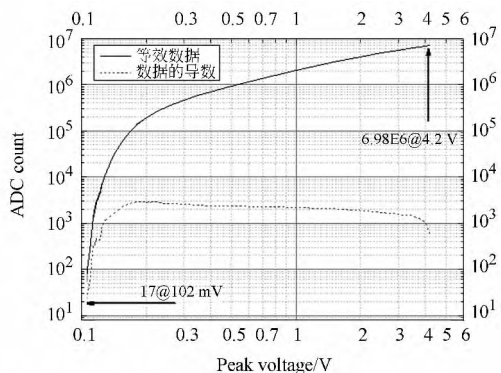
3.3 输出动态范围结果

图 8(a) 为 FEE 板测得的 PMT 各打拿极输出, 其坐标为双对数显示。横坐标为输入信号的峰值电压, 纵坐标为 FEE 板采样输出的 ADC 码。



(a) PMT 打拿极的输出

(a) Peak voltages of dynodes of PMT



(b) 等效数据输出

(b) Output of equivalent data

图 8 FEE 测量到的各打拿极输出

Fig. 8 Output from each dynode measured by FEE

由图可知, 在相同的输入情况下, DY2 获得的增益最小, DY5 次之, DY8 最大。因此, 在每个打拿极测量范围有限的情况下, DY2 可以测量高能段, DY5 测量中等能量, DY8 测量小能量。为更直观地观察动态范围, 将 DY2、DY5 的散点分别乘上它们相对于 DY8 的增益, 使之与 DY8 相同, 结果如图 8(b) 的实线所示。从图中可知, 该系统的动态范围达 4.11×10^5 , 优于暗物质粒子探测卫星的动态范围需求。

3.4 线性度分析

图 8(b) 所示的虚线为等效数据的导数。在小电压时, 导数较小且随着测试电压的增大而增

大,此时系统处于非线性区。当测试电压增大至0.2 V以后,导数进入平坦区,此时系统输出近似为线性。

4 结 论

本文针对暗物质粒子探测卫星对于测试PMT的需求,设计了大动态范围闪烁晶体荧光模拟器。首先测量了PMT在宇宙线下的真实荧光,并以此建立了数学模型。然后选择了LED,

保证LED电流/光通量的线性,并设计了驱动电路,保证了输入信号的信噪比,增加了系统的动态范围。

测试实验表明,模拟器的输出荧光与PMT实际荧光相似,满足暗物质粒子探测卫星的实际需求。模拟器的动态范围达 4.11×10^5 倍,高于BGO探测器单元的动态范围指标(1.8×10^5 倍)。另外,通过采用积分球可将模拟荧光脉冲同时均匀输出给多个PMT,满足暗物质粒子探测卫星工程研制阶段对PMT进行批量测试的需求。

参考文献:

- [1] 常进. 暗物质粒子探测:意义、方法、进展及展望[J]. 工程研究, 2010, 2(2):95-99.
CHANG J. Dark matter particles detection in space [J]. *Journal of Engineering Studies*, 2010, 2(2): 95-99. (in Chinese)
- [2] 张云龙. 空间暗物质探测电磁量能器的研究[D]. 合肥:中国科学技术大学, 2011.
ZHANG Y L. *The Study of an EM Calorimeter for Searching Dark Matter in Space* [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2011. (in Chinese)
- [3] 廖晶莹, 叶崇志, 杨培志. 锗酸铋闪烁晶体的研究综述[J]. 化学研究, 2004, 15(4):52-58.
LIAO J Y, YE CH ZH, YANG P ZH. Review on the research of $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ scintillation crystals[J]. *Chemical Research*, 2004, 15(4):52-58. (in Chinese)
- [4] 封常青. 空间暗物质探测卫星量能器读出电子学方法研究[D]. 合肥:中国科学技术大学, 2011.
FENG CH Q. *The Research on the Readout Electronics for the Calorimeter Detector of the Dark Matter Exploration Satellite* [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2011. (in Chinese)
- [5] HAMAMATSU. *Photomultiplier Tubes R5611* [EB/OL]. 1995[2013-01]. http://sales.hamamatsu.com/assets/pdf/parts_R/R5611.pdf.
- [6] 肖刚. 宇宙线 τ 中微子望远镜设计及光电倍增管的标定[D]. 成都:西南交通大学, 2005.
XIAO G. *Cosmic Rays Tau Neutrino Telescope Design and Photomultiplier Tube Calibration* [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2005. (in Chinese)
- [7] GEMMEKE H, KLEIFGES M, KOPMANN A, *et al.*. Single photoelectron resolution for the calibration of photomultiplier systems [C]. *Nuclear Science Symposium Conference Record*, 2005 IEEE, Forschungszentrum Karlsruhe, Germany, 2005: 887-890.
- [8] LUBSANDORZHIEV B K, LUBSANDORZHIEV N B, POLESHUK R V, *et al.*. Calibration system of the TUNKA-133 EAS Cherenkov Array [C]. *32nd International Cosmic Ray Conference*, Beijing, 2011(3):239.
- [9] 刘洪兴, 孙景旭, 刘则洵, 等. 氙灯和发光二极管作光源的积分球太阳光谱模拟器[J]. 光学精密工程, 2012, 20(7):1447-1454.
LIU H X, SUN J X, LIU Z X, *et al.*. Design of integrating sphere solar spectrum simulator based on xenon lamp and LEDs [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(7):1447-1454. (in Chinese)
- [10] 王淑荣, 邢进, 李福田. 利用积分球光源定标空间紫外遥感光谱辐射计[J]. 光学精密工程, 2006, 14(2):185-190.
WANG SH R, XING J, LI F T. Spectral radiance responsivity calibration of ultraviolet remote sensing spectroradiometer in space using integrating sphere [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(2): 185-190. (in Chinese)
- [11] 陈凤, 袁银麟, 郑小兵, 等. LED的光谱分布可调光源的设计[J]. 光学精密工程, 2008, 16(11): 2060-2064.
CHEN F, YUAN Y L, XHENG X B, *et al.*. De-

- sign of spectral tunable LED light source [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(11):2060-2064. (in Chinese)
- [12] 郭建华, 蔡明生, 胡一鸣, 等. 暗物质空间探测器 BGO 量能器的读出设计[J]. 天文学报, 2012, 53(1):72-79.
- GUO J H, CAI M SH, HU Y M, *et al.*. Readout electronics design of prototype of BGO calorimeter in Chinese space detector for dark matter particle [J]. *Acta Astronomica Sinica*, 2012, 53(1):72-79. (in Chinese)
- [13] 徐克尊. 粒子探测技术[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1981.
- XU K Z. *Particle Detection Technology* [M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1981. (in Chinese)
- [14] 黄丽霞. LED 可控恒流源驱动系统设计[J]. 宁德师专学报: 自然科学版, 2011, 23(1):44-48.
- HUANG L X. Designing of the driving system of LED constant current power [J]. *Journal of Ningde Teachers College: Natural Science*, 2011, 23(1):44-48. (in Chinese)
- [15] ZHANG Y L, LI B, FENG C Q, *et al.*. A high dynamic range readout unit for a calorimeter[J]. *Chinese Physics C*, 2012, 36(1):71-73.

作者简介:



项 天(1986—),男,天津人,博士研究生,2009 年于中国科学技术大学获得学士学位,主要从事数字、模拟硬件系统、SoC 设计、计算机体系结构方面的研究。E-mail: xt860706@mail.ustc.edu.cn

导师简介:



金 西(1970—),男,安徽合肥人,副教授,主要从事数字集成电路设计、微电子学与固体电子学、SoC 设计以及计算机应用方面的研究。E-mail: jinxi@ustc.edu.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)