

望远镜式空间带电粒子探测系统研制

成昱昱, 兰小飞, 石宗仁, 汤秀章
(中国原子能科学研究院, 北京 102413)

摘要: 为满足空间高能粒子环境探测要求, 研制了一套数字化空间电子、质子注量率能谱探测系统原理样机。该探测系统采用了半导体探测器组成的望远镜式结构, 并应用了数字化的信号处理方法, 能探测 0.5 MeV 以上的电子和 5~300 MeV 的质子; 具有能够实时测量、体积小、重量轻、功耗低及可靠性高等优点。对该系统的各探测器的能量分辨率进行了实验测试, 结果表明: TSi 半导体探测器的能量分辨率可达 0.5%, Si(Li)探测器的能量分辨率约为 1.02%, 均在可接受范围 (小于 5%) 内。

关键词: 空间环境; 带电粒子; 探测系统; 半导体望远镜; 脉冲分析; 三重符合

中图分类号: V417.9

文献标志码: A

文章编号: 1673-1379(2016)04-0364-06

DOI: 10.3969/j.issn.1673-1379.2016.04.005

Development of space charged particle detection system of telescope style

CHENG Yumin, LAN Xiaofei, SHI Zongren, TANG Xiuzhang
(China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China)

Abstract: A space charged particle detection system is developed for detecting the space electron and proton fluence rate spectra, with a telescope-style structure made up of semiconductor detectors, and digital methods are used. It can detect electrons of more than 0.5 MeV and protons between 5 MeV and 300 MeV. The system is characterized by light weight, low power consumption, small size and high reliability. The energy resolution of the system is tested. The results show that the best energy resolution of the TSi semiconductor detectors is up to 0.5%, and that of the Si(Li) semiconductor detectors is about 1.02%; both are within the acceptable range (<5%).

Key words: space environment; charged particles; detection system; semiconductor telescope; pulse analysis; triple coincidence

0 引言

开展空间粒子探测一方面可为研究空间物理现象和机制提供分析数据, 空间粒子的通量和能谱的变化可为空间灾害性事件提供预警^[1-3]; 另一方面可为载人航天的飞行安全提供保障。因此, 空间粒子探测既是人们进行空间探测、研究太空物理学现象的基本方法, 也是人们认识和研究太空、向太空进军的必要条件^[4-5]。

用于空间粒子探测的探测器主要有以下几种^[3]:

1) 气体探测器, 它在空间粒子探测的早期曾起过很大作用, 现主要用于探测 X 射线; 2) 闪烁体探测器, 只在探测中高能粒子时适用; 3) 切伦科夫探测器, 亦只用于探测高能粒子; 4) 半导体探测器,

收集带电粒子入射后由电离效应所产生的电子-空穴对, 可测量从低能到高能的大部分带电粒子, 其材料主要是硅和锗。由于半导体探测器具有体积小、重量轻、能量分辨率高等优点而广泛应用于空间粒子的探测, 主要用到的有漂移型、面垒型、高纯型硅(锗)探测器^[6]。

空间带电粒子探测方法主要有半导体望远镜测量法、电场加速法、磁偏转法等^[7]。半导体望远镜测量法是基于带电粒子能量沉积原理, 仪器的入射窗非常薄甚至没有; 传感器使用 2~3 片半导体探测器再加上电子线路; 利用质子和电子的射程差异, 配以合适的鉴别方法和符合电路进行测量和鉴别。该方法的优点是: 仪器设计和电子线路、原

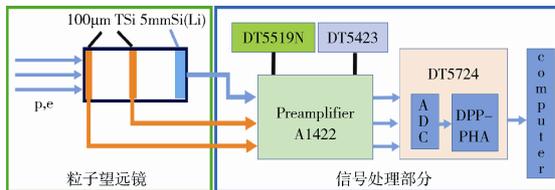
理简单;只要仪器工艺和制作技术达到要求,就能较好地满足能量道划分和能量测量的需要^[8-9]。

在探测器信号处理方面,传统的模拟信号处理方法由于电子线路体积笨重、抗干扰能力差等缺点,已经越来越难以满足空间探测日益增长的技术需求。而基于数字信号处理的方法在粒子探测器信号处理中应用越来越广泛^[8]。

由于航天器的特殊性,航天用粒子探测系统与地面粒子探测系统的重大差别主要表现在前者要求体积小、重量轻、功耗低及可靠性高等方面^[7-8]。为满足空间高能粒子环境探测要求,自研了一套用于航天器舱外和舱内电子、质子注量率和能谱测量的探测系统(包括硬件和软件),并通过实验对该系统的能量分辨率水平进行测试。

1 探测系统硬件结构设计

探测系统探头部分采用了硅半导体探测器并使用粒子望远镜的结构方式。粒子鉴别及能谱测量采用了能量射程法、脉冲幅度分析法等。空间探测系统要求实时测量、空地通信数据量少、体积小,故信号处理部分采用了数字化的方法。粒子探测系统的整体结构如图1所示。



注: A1422为前置放大器;DT5519N为探测器偏置电源;DT5423为前置放大器电源;DT5724为数字仪。

图1 探测系统整体结构

Fig. 1 Whole structure of detection system

该系统由粒子望远镜和信号处理两部分组成。粒子望远镜的探测器包括2块厚100 μm的离子注入Si半导体探测器(TSi)和1块厚5 mm的锂漂移Si半导体探测器。信号处理部分包括核电子学电路和软件程序。粒子望远镜探测器输出的3路脉冲信号经前置电荷灵敏放大器后得到一定幅度的最佳信噪比的脉冲;然后进入数字仪的A/D转换器进行模数转换;转换后的信号进入数字仪的DPP-PHA(脉冲幅度分析)固件进行符合处理,包括梯形滤波成形及幅度分析,以判断3路信号脉冲是否由同一入射粒子产生;之后将符合的3路信号时间、幅度等信息送入计算机处理。采集软件控

制DPP-PHA固件运行及其与计算机的通信。数据处理程序通过信号的分辨系数识别质子和电子,得出最终的能谱。由于在A/D转换器里有多个寄存器,信号处理部分几乎没有死时间,所以整个系统的信号处理能力只取决于脉冲成形宽度。而通常前置放大器输出的脉冲宽度一般为50 μs,经梯形成形后约为5 μs,故其最大测量通量可达10⁵/s数量级。

1.1 带电粒子望远镜

1.1.1 望远镜结构设计

粒子望远镜结构如图2所示。按粒子入射顺序,望远镜由以下部件组成:

1) 由于半导体探测器对光灵敏,在入口处放置挡光膜,这里采用具一定机械强度的厚15 μm的铝膜。

2) 2个全耗尽透射型离子注入Si半导体探测器,直径19.54 mm,厚100 μm,有效探测面积300 mm²;出厂噪声水平11 keV FWHM;对²⁴¹Am α源的出厂分辨率为16 keV FWHM。

3) 1个Li漂移Si探测器,直径15.96 mm,厚5 mm,有效探测面积200 mm²;它能阻止30 MeV的质子;对²⁴¹Am α源的出厂分辨率为38 keV FWHM。

3个探测器在厚5 mm的铝筒内定位和紧固,入口呈喇叭口形,有利于屏蔽低能电子和质子。

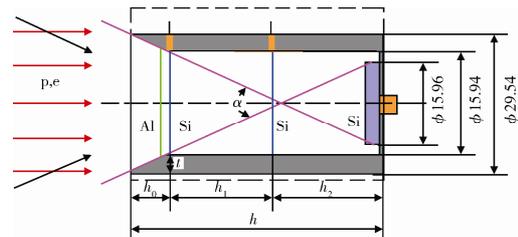


图2 粒子望远镜结构

Fig. 2 Structure of the particle telescope

粒子望远镜各参数定义见图2。综合考虑离子的注量率以及电路处理能力等因素,取 $\alpha=30^\circ$,则探测器的各参数分别为: $h_1=h_2=31.3$ mm, $h_0=16.9$ mm, $h=16.9+62.6=79.5$ mm。立体角 $\Omega=0.214$,占 4π 立体角的比例为0.017。

为减少侧面入射的电子和低能质子,从而减少每个探测器的非关联的计数率,探测器需要选取适当的壁厚。由于质子的穿透能力远小于电子,此处仅需考虑屏蔽较低能量的电子即可。表1是计算得

出的各能量的电子在铝中的射程。从表1可以看出:当铝筒壁厚约为5 mm时,垂直筒壁入射的2 MeV电子将全部被阻止(低于17.5 MeV的质子也将被阻止)。

表1 电子在铝中的射程同能量的关系
Table 1 Relationship between the range of electrons in aluminum and their energies

能量 E_e/MeV	射程 $R/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-2})$	铝筒壁厚 D/cm
1	0.555	0.205
2	1.224	0.452
3	1.869	0.692
4	2.491	0.923

1.1.2 粒子望远镜中能量沉积计算

根据质子和电子在Si中的比能量损失、射程及下述公式编写程序,计算它们在3个探测器中的能量沉积,其中, E_1 是粒子的初始能量, E_i 和 ΔE_i 分别是入射到第*i*个探测器的能量及其能量沉积。

$$E_2 = E_1 - \Delta E_1, \quad (1)$$

$$E_3 = E_2 - \Delta E_2. \quad (2)$$

利用射程-能量关系,

$$\Delta X_i = R(E_i) - R(E_{i+1}), \quad (3)$$

式中 ΔX_i 是探测器的厚度,其中 $\Delta X_1 = \Delta X_2 = 100 \mu\text{m}$ (相当于 $0.0233 \text{ g}/\text{cm}^2$), $\Delta X_3 = 5 \text{ mm}$ (相当于 $1.165 \text{ g}/\text{cm}^2$); $R(E_i)$ 是入射到第*i*个探测器的能量为 E_i 的粒子的射程, $R(E_{i+1})$ 是经厚度 ΔX_i 探测器的剩余射程。通过内插法,找出 $R(E_{i+1})$ 对应的能量 E_{i+1} ,则沉积能量为

$$\Delta E_i = E_i - E_{i+1}. \quad (4)$$

由以上各式可以计算出各能量质子和电子在各探测器中的沉积能量,如图3所示。

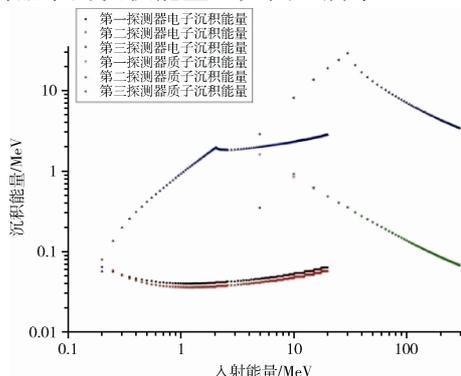


图3 质子和电子在各探测器中的沉积能量

Fig. 3 Deposited energy of protons and electrons in the probe

由图3可知:

1) 对于质子: ① 在2个TSi探测器中的沉积能量随入射能量增加而单调减少;入射能量在10 MeV以上时沉积能量基本没有差异;入射能量在

300 MeV时,能量沉积为67 keV,仍然高于噪声水平。② 在Si(Li)探测器中,当入射能量 $< 30 \text{ MeV}$ 时,沉积能量等于入射到该探测器的能量;当入射能量 $> 30 \text{ MeV}$ 时,能量沉积单调减少,但仍高于在TSi中沉积能量的50倍;入射能量在30 MeV时,沉积能量达到极大。

2) 对于电子:当入射能量 $< 2 \text{ MeV}$ 时,在2个TSi中的能量沉积随电子能量增加而单调减少,最小为36 keV,仍然高于噪声水平;在Si(Li)探测器沉积全部能量。当入射能量 $\geq 2 \text{ MeV}$ 时,能量沉积缓慢上升。

综上,2 MeV电子和30 MeV质子在Si(Li)探测器中具有一个沉积能量极大值,其幅度可作为能量标度。

1.1.3 质子和电子的鉴别

定义电子和质子的分辨系数为

$$\eta = \Delta E_1 \cdot \Delta E_3. \quad (5)$$

0.5~20 MeV电子的 η 值为0.018~0.18,5~300 MeV质子的 η 值为10.4~0.227,因此可使用分辨系数来区分电子和质子。计算的电子和质子分辨系数如图4所示,分别用黑线和红线表示,可见电子和质子明显被区分开来。

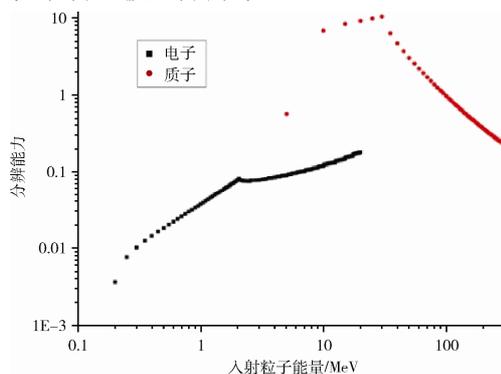


图4 电子和质子分辨系数

Fig. 4 Resolving power for electron and proton

1.1.4 入射角对沉积能量的影响

编程计算了入射角对沉积能量的影响。 $\alpha = 30^\circ$,故对应的粒子入射角是 $0^\circ \sim 15^\circ$ 。因此取中心角度 7.5° 为基准入射角。则入射角为 0° 和 15° 时的沉积能量相对于以基准角入射时有一定展宽。表2以200 MeV的质子为例来说明。

根据 ΔE_3 ,此时 0° 和 15° 入射时对应于 7.5° 入射时的质子能量分别为205.0 MeV和194.1 MeV,

其能量误差分别为 2.5%和 2.9%，均在可以接受的误差范围内。

表 2 200 MeV 质子斜入射时的沉积能量展宽
Table 2 Broadening of deposited energy of the 200 MeV oblique-incidence proton

质子入射角/(°)	$\Delta E_1/\text{MeV}$	$\Delta E_2/\text{MeV}$	$\Delta E_3/\text{MeV}$
7.5	0.085 3	0.085 3	4.28 5
0	0.084 5	0.084 6	4.24 7
15	0.087 5	0.087 5	4.40 0

1.2 信号处理部分

带电粒子在探测器中产生的电离脉冲信号经前置放大器进入数字仪。数字仪的核心固件是数字脉冲处理器 (DPP)。

数字仪工作原理如图 5 所示。前置放大器输出脉冲信号经 A/D 转换器转化为数字脉冲信号后分两路：一路信号作为触发和定时，滤除噪声和虚假信号，同时提供触发信号和时间标志信号，触发信号将控制另一路的输出；另一路信号经 DPP 的梯形滤波器成形后用于测量脉冲的各参数，DPP 将所获取信号的时间标志、幅度、波形等信息集中生成一个 Event。在数字仪的 FPGA 间处理各路符合。当每路信号脉冲幅度超过阈值后，将分别产生一个触发请求脉冲 T_{ST} ；当 3 路的 T_{ST} 都出现在预置符合窗 T_{TVAW} 时，将产生一个符合输出触发信号。该信号控制 DPP 生成的 Event 是否存入存储器。

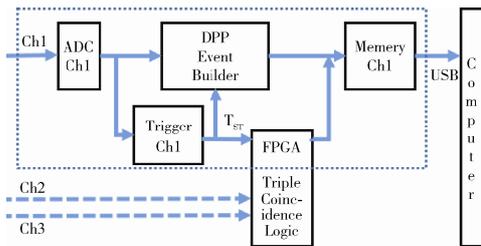


图 5 数字仪工作原理

Fig. 5 The working principle of the digitizer

由采集软件经 USB 获取一定时间下满足符合条件的数字化脉冲分析仪的数据，解析出各个沉积信号的波形、幅度、时间等参数，并输出表格文件。数据处理程序处理采集软件的输出文件，借分辨系数识别质子和电子，随后分别得到电子和质子的能谱及其分区段的计数^[10]。

2 软件编程

2.1 采集软件

采用的数字仪是 CAEN 公司的 DT5724，其

DPP 固件是 DPP-PHA (脉冲幅度分析)，数据采集软件使用 LabView2014 编写。采集软件的作用有：设置 DPP 固件的各参数；控制 DPP 的运行；从 DPP 获取各 Event 信息并进行处理得到各波形图、沉积谱等；输出格式化数据供数据处理软件进行最终计算。采集软件的控制及显示界面如图 6 所示。

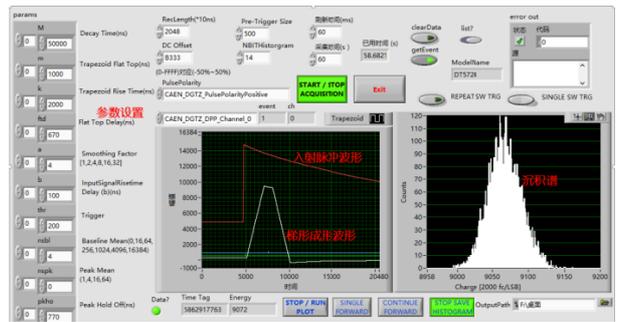


图 6 采集软件控制及显示界面

Fig. 6 Control and display interface of the acquisition software

在此探测系统中，符合是非常重要的环节，它能保证数字仪的 3 个通道同时采集到的数据是来源于同一个粒子在 3 个探测器中的沉积能量，只有这样才能根据沉积能量反推入射粒子的能量。符合功能在编写采集软件中实现。在数字化仪 DT5724 中，数据采集的触发信号通过一个全局触发信号来控制，全局触发信号由各路的触发信号通过运算生成。在这里即是要求 3 个探测器接受同一粒子沉积能量产生脉冲使 3 路信号同时触发才能产生全局触发信号。采用全局触发信号代替原各路各自的触发信号来同时控制 3 路的采集即可实现 3 路符合^[11]。

2.2 数据处理程序

采集软件列表输出一定时间内各路沉积信号的时间标志、能量等信息，其中能量幅度是用与能量成线性关系的道数表示的。采用一定能量的放射源进行标定后可以得到沉积能量与道数的具体线性关系，从而将道数换算成沉积能量。在数据处理程序中也通过时间标志对 3 路信号进行进一步的符合判定。图 7 是数据处理程序的流程。在程序找出属于同一个入射粒子产生的 3 路沉积能量后，首先根据前文所述质子和电子的分辨系数判断入粒子种类，然后根据 3 个沉积能量计算判断其对应的入射粒子能量。将一定时间内所有数据处理完后即可得到入射粒子的能谱 (分段计数谱)。

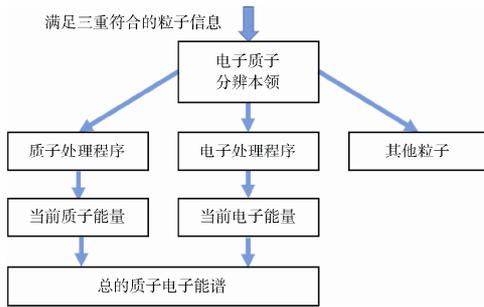


图7 数据处理程序流程

Fig. 7 Flowchart of the data processing program

3 能量分辨率实验测试

实验测试了各探测器的能量分辨率(半高展宽/中心能量)。

图8是实验测量接入离子注入TSi半导体探测器在不同偏置电压后参考信号的能量分辨率,确定了离子注入TSi半导体探测器最佳工作偏压范围为50~70V;在这个偏压下,TSi半导体探测器的能量分辨率最好可达0.5%。能量分辨率对测量结果误差的影响非常小。

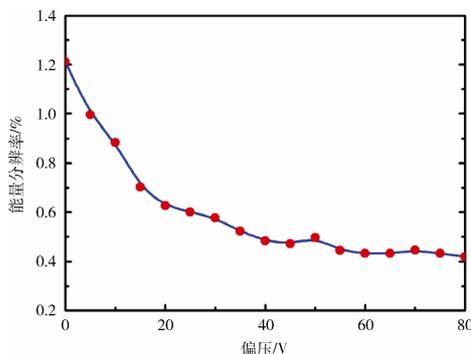


图8 TSi半导体探测器能量分辨率

Fig. 8 Energy resolution of TSi semiconductor detector

采用 $^{241}\text{Am}\alpha$ 源对5mm厚的Si(Li)探测器进行了以下3项内容的测试,目的是测量探测系统的噪声:

- 1) 不接探测器、加高压,只接入参考信号,然后测脉冲谱;
- 2) 接入探测器、加偏压,测参考信号的谱;
- 3) 加入放射源,重复2)的过程,标定噪声。

由于是直接空气中测量,同时放射源并不是专用于刻度的放射源,其质量不能完全满足要求,导致测得 $^{241}\text{Am}\alpha$ 源的能谱成了一个连续谱,但可以估算出探测器的噪声信号的量级。

5mm厚Si(Li)探测器的测试结果见图9。

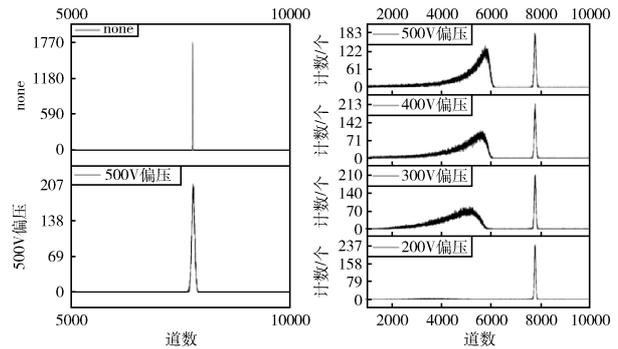


图9 5mm厚Si(Li)探测器的测试

Fig. 9 Test of Si(Li) detector of 5mm thick

图9左图是第1)项和第2)项的结果的比较,明显可以看出下图峰的半高宽79.1道(FWHM)要远大于上图。这个展宽可以认为是由5mm厚Si(Li)探测器噪声引起的,由此得Si(Li)探测器的能量分辨率约为 $79.1/7781 \approx 1.02\%$ 。

图9右图是测试第3)项时得到的沉积谱。当偏压低于200V时,几乎没有办法测到放射源的 α 能谱——因为偏压太低, α 粒子在探测器内产生的电子-空穴对复合率太高。随着偏压的加高,放射源的信号幅度增加,在偏压超过400V以后,变化不大——可以把500V偏压的放射源的能谱的截止道数(约6100道)看成是 ^{241}Am 源 α 粒子的最大能量5486keV。其对应的信号发生器产生的信号半高宽为79.5道。因此测得能量分辨率约为 $79.5/6100 \times 5486 \text{ keV} \approx 71 \text{ keV FWHM}$ 。由于受测试条件的限制,这个噪声比探测器实际的噪声要大。

因缺少 $^{90}\text{Sr}\beta$ 放射源,暂未进行以下2项测试:测量探测系统的符合分辨曲线以确定符合窗的大小;对探测系统的道数-能量转化关系进行标定。

4 结束语

设计研制了包括粒子望远镜、核电子学电路等硬件以及采集软件、数据处理程序等软件在内的全套电子和质子探测系统原理样机。使用该系统,可以将质子和电子入射到望远镜产生的电离信号逐步处理得到入射粒子的能量,并最终得出一定时间的累积能谱。测试和计算表明,探测系统能量分辨率、其他种类粒子干扰、入射角不同等引起的测量误差均在可以接受的范围内。

参考文献 (References)

- [1] 叶宗海. 空间粒子辐射探测技术[M]. 北京: 科学出版

- 社, 1986
- [2] 焦维新. 空间探测[M]. 北京: 北京大学出版社, 2002
- [3] LUTZ G. 半导体辐射探测器[M]. 刘忠立, 译. 北京: 国防工业出版社, 2004
- [4] 楼滨乔. 卫星用粒子探测系统[J]. 中国空间科学技术, 1993, 10(5): 29-31
- LOU B Q. A particle detector system for satellite[J]. Chinese Space Science and Technology, 1993, 10(5): 29-31
- [5] 都亨, 叶宗海. 中国空间环境研究进展: 空间物理前沿进展[M]. 北京: 气象出版社, 1998
- [6] 张坤毅. 中高能粒子探测器的设计与研制[D]. 北京: 中国科学院空间科学与应用研究中心, 2006
- [7] 叶宗海. 空间环境对航天活动的影响[J]. 载人航天, 1997, 1: 52-60
- [8] 张坤毅, 王世金. 空间能量粒子探测方法研究[J]. 上海航天, 2004, 21(6): 50-54
- ZHANG S Y, WANG S J. The analysis of energetic particle detecting method[J]. Aerospace Shanghai, 2004, 21(6): 50-54
- [9] MCENTIRE R W, KEATH E P, FORT D E, et al. The medium energy particle analyzer (MEPA) on the AMPTE CCE spacecraft[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1985, GE-23: 230-233
- [10] 殷树娟, 李翔宇. 粒子探测电路的系统建模[J]. 微电子学与计算机, 2013, 30(7): 1-5
- YIN S J, LI X Y. System modeling of particle detector circuit[J]. Microelectronics & Computer, 2013, 30(7): 1-5
- [11] 霍强, 张靖. 用于符合测量的多通道符合计数器[J]. 量子光学学报, 2011, 17(2): 135-140
- HUO Q, ZHANG J. Multi-channel coincidence counter for coincidence measurement[J]. Acta Sinica Quantum Optica, 2011, 17(2): 135-140

(编辑: 许京媛)

作者简介: 成昱旻(1990—), 男, 硕士研究生, 现主要从事半导体粒子探测系统研究; E-mail: 575958261@qq.com。指导教师: 兰小飞(1981—), 男, 博士学位, 副研究员, 现主要从事激光与物质相互作用以及激光核物理方面的研究; 汤秀章(1966—), 男, 博士学位, 研究员, 主要从事激光驱动惯性约束聚变和强激光技术应用方面的研究。