

文章编号: 1007-4627(2017)02-0190-05

CsI(Tl)+Si-APD 探测器的性能测试

焦磊^{1,2}, 金仕纶², 李加兴^{3,†}, 王建松², 杨彦云², 马朋², 马军兵²,
白真², 刘星泉², 周济人¹, 段芳芳^{2,3}, 张兴^{2,3}

(1. 重庆大学动力工程学院, 重庆 400044;
2. 中国科学院近代物理研究所, 兰州 730000;
3. 西南大学物理科学与技术学院, 重庆 400715)

摘要: 介绍了 Si-APD 的工作原理并对 Si-APD 中的暗电流进行了理论分析。基于 RIBLL 上产生的放射性核束流, 使用 CsI(Tl)+Si-APD 探测器对中能重离子进行了能量测试。测试结果显示, CsI(Tl)+Si-APD 探测器测量 20 MeV/u 的重离子时, 可得到 3% 的能量分辨; 同时还发现 Si-APD 中的暗电流大小以及入射粒子的能量大小都会对探测器的能量分辨产生影响。

关键词: 暗电流; CsI(Tl); Si-APD; 能量分辨

中图分类号: O571 **文献标志码:** A **DOI:** 10.11804/NuclPhysRev.34.02.190

1 引言

CsI(Tl) 闪烁晶体具有密度大、机械强度大、发光效率高等优点, 与其他闪烁体相比更易于加工储存, 而且价格低廉, 因此在放射性核束的实验研究中, 通常采用 CsI(Tl) 探测器对带电粒子进行能量测量。近年来, 随着与 CsI(Tl) 晶体闪烁光谱相匹配的 Si-APD(Avalanche Photo Diode) 的发展, CsI(Tl) 先后被日本高能物理研究所、美国的斯坦福直线加速器中心以及我国北京正负电子对撞机用作电磁量能器的材料、中国科学院近代物理研究所在兰州重离子加速器(HIRFL)的各种实验中也应用了由 CsI(Tl) 材料制成的多种探测器件。

此前大量的实验中所使用的 CsI(Tl) 探测器是由 CsI(Tl) 晶体和光电倍增管(PMT) 构成, 由于 PMT 体积大, 占用较多空间且移动比较麻烦, 还需要安插很多的线路才能确保其正常地工作, 而 Si-APD 体积很小, 节约靶室空间的同时所需要的线路也较少, 使用起来比较方便, 此外, 相比于 PMT, Si-APD 还具有量子效率高、响应速度快、对磁场的敏感度低、功耗低等优点。因此本次实验尝试使用 CsI(Tl) 晶体结合 Si-APD 来进行一些测试, 也为今后能在放射性核束实验中广泛

地应用 Si-APD 做一个探索。暗电流作为噪声, 对光探测是不利的, 因为噪声最终决定了最小可探测信号的强度, 而且暗电流太大还会使 CsI(Tl) 探测器对带电粒子的能量分辨变差, 而好的能量分辨是对反应产物完全运动学测量以及在碎裂反应中重构不变质量谱的基础。因此, 较低的暗电流和好的能量分辨成为评价此次使用的探测器性能好坏的两个关键指标。

本工作研究 CsI(Tl)+Si-APD 探测器的性能等相关问题, 并通过暗电流测试结果以及重离子束流测试结果对该探测器系统性能进行评价。

2 Si-APD 的工作原理

APD 是利用 PN 结在反向高压作用下产生雪崩效应来进行工作的一种二极管。当入射光照射至器件表面(P) 时, 光子吸收区产生光生载流子, 光生载流子在强电场的作用下作高速定向运动, 具有很高动能的光生电子或空穴与晶格原子碰撞, 使得晶格原子发生电离, 产生二次电子空穴对, 二次电子空穴对在电场的作用下获得足够的动能, 又使晶格原子电离产生新的电子空穴对, 这个过程像“雪崩”一样进行下去。如此进行多次碰撞, 产生连锁反应, 致使载流子雪崩式倍增, 达到对

收稿日期: 2016-06-24 修改日期: 2016-08-24

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(U1432247, U1332126, 11075133, 11575256, 10205019); 国家重点基础研究发展计划(973计划)资助项目(2014CB845405); “西部青年学者”项目(科发人函字[2015]90号)

作者简介: 焦磊(1992-), 男, 江西南昌人, 硕士研究生, 从事实验核物理研究; E-mail: jiaolei1992@126.com

† 通信作者: 李加兴, E-mail: 48124623@qq.com.

光信号的探测和放大的效果。图 1 为 APD 中载流子雪崩式倍增的示意图。

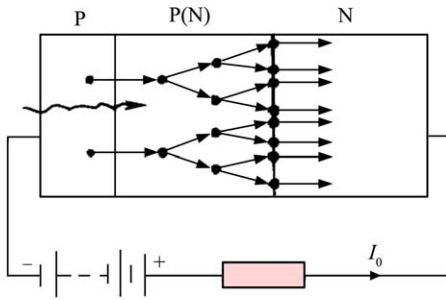


图 1 APD 中载流子雪崩式倍增示意图

在材料选择上, 本次实验使用的是由硅材料制造而成的 APD, 硅材料适用于对可见光和近红外线的检测且具有较低的倍增噪声。与普通二极管相比, APD 具有灵敏度高、高增益、工作电压高以及噪声大等特点, 其中暗电流作为一种噪声, 会直接影响 APD 的性能, 从而会决定整个探测器的探测水平。

3 Si-APD 中的暗电流分析

无光照时, Si-APD 在反偏压作用下, 半导体内部由于热电子发射等原因, 会产生空穴电子对, 它们在电场的帮助下作定向移动会产生电流, 这部分电流称为 Si-APD 的暗电流。Si-APD 的暗电流主要由体暗电流和表面漏电流所组成, 其中 Si-APD 的体暗电流实际上是对普通 PN 结中体暗电流的一个放大。

倍增产生的体暗电流主要包括扩散电流, 产生-复合电流和隧穿电流。由于 Si 是宽禁带半导体, 其扩散电流相比于产生-复合电流和隧穿电流可忽略不计。以普通 PN 结为例。

产生-复合电流 I_{G-R} 可表示为

$$I_{G-R} = \frac{1}{2}qAL_D\left(\frac{n_i}{\tau}\right), \quad (1)$$

其中: q 为电子电荷; A 为器件截面积; n_i 为本征载流子浓度; τ 为耗尽层中载流子的有效寿命; L_D 为耗尽层长度。

最后由于隧道效应而形成的隧穿电流 I_{BT} 可表示为

$$I_{BT} = A \exp\left(-\frac{E_a}{KT}\right), \quad (2)$$

其中: E_a 为激活能; K 为电子与空穴的离化率; T 为温度。对于 Si-APD 来讲: 会对普通 PN 结内体电流进行一个倍增, 可表示为

$$I_T = (I_{G-R} + I_{BT})M, \quad (3)$$

其中 M 为 Si-APD 的倍增系数^[3]。

不倍增的表面漏电流的形成是因为在制备工艺中引起的表面缺陷和污染会在器件表面形成复合中心, 在热平衡时, 载流子通过复合中心时的产生率等于复合率, 如果此时施加一个反偏电压在 APD 的两端时, 载流子的产生率和复合率不再相等, 这时就会形成一个复合电流。

从式 (1) 和式 (2) 可知: 产生-复合电流与器件截面积 A 和本征载流子浓度 n_i 成正比, 与载流子的有效寿命 τ 成反比; 而隧穿电流与器件截面积 A 和温度 T 成正比。因此, 要减少 Si-APD 的体暗电流, 可以通过减小器件截面积, 降低工作温度, 以及选取本征载流子浓度低或载流子有效寿命长的材料等来达到目的。对于减小表面漏电流, 可以通过改善器件表面钝化工艺或提高材料质量等措施来实现。

4 重离子束流测试系统

本次实验中, 由兰州重离子分离扇回旋加速器 (SSC) 提供 60 MeV/u 的 ^{16}O 束流, 在 RIBLL 的初级靶 T0 处轰击 3 mm 厚的 Be 靶。产生的次级产物经过 RIBLL 选择后传输至 T2 处测量。在 T1 和 T2 处分别放置有 25 和 10 μm 厚的闪烁膜时间探测器, 用于测量飞行时间 (TOF), 带电粒子从 T1 飞行到 T2 距离为 17 m。在第 2 个闪烁膜时间探测器后放置了 4 小块 CsI(Tl) 晶体, CsI(Tl) 晶体与 Si-APD 耦合的一面采用抛光处理, 其余面使用漫散射处理。Si-APD 引出的信号先通过前置放大器, 再经过主放大器后由 ADC 进行获取, 暗电流信号最终由 Ortec710 插件读出。

图 2 为 CsI(Tl) 探测器对带电粒子能量响应过程示意图, 使用的 CsI(Tl) 晶体由中国科学院近代物理研究所研制, 晶体为前表面 21 mm×21 mm, 后表面 23.1 mm×23.1 mm, 高 50 mm 的棱台。一定能量的带电粒子从 CsI(Tl) 晶体的前表面入射, 在晶体中发生电磁相互作用从而沉积能量, 同时转化为一定数量的闪烁光子, 产生的闪烁光子在 CsI(Tl) 晶体内传播, 经过多次

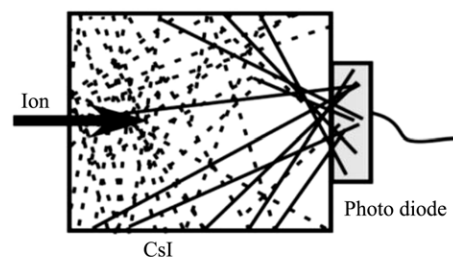


图 2 CsI 探测器对带电粒子能量响应过程^[5]

反射和折射后，光信号最终由硅雪崩二极管 (APD Hamamatsu S8864-1010 10 mm×10 mm) 读出。图 3 给出了电离室 dE 信号与飞行时间 (TOF) 信号关联图，实验中 RIBLL 按 $^{16}\text{O}^{8+}$ 的磁刚度进行设置，降能片设为 0.4 mm Al，C1 处的狭缝为 ±8 mm，C2 处的狭缝为 ±15 mm。

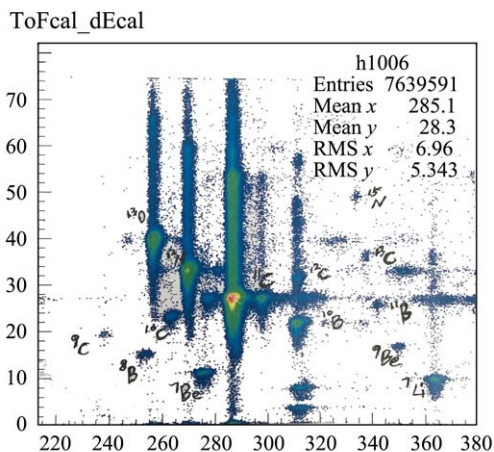


图 3 (在线彩图) 次级产物的 TOF-dE 二维谱

5 测试过程与结果分析

本次实验主要进行以下测试，由于测试时间较短，可认为在测试期间 Si-APD 的工作温度没有变化。

(1) 反偏电压对暗电流的影响测试

实验中保持温度恒定，对每块 CsI(Tl) 晶体的 Si-APD 的偏压进行独立调节，以研究在相同温度环境下，不同偏压对暗电流的影响。首先对每块 CsI(Tl) 晶体的 Si-APD 施加相同的偏压，电压初始值为 280 V，每间隔十分钟增加 10 V，图 4 给出了从 4 块 CsI(Tl) 晶体中获取的 ^{11}C 全能峰所对应的道数与偏压的关系 (1 路为黑线，2 路为红线，3 路为蓝线，4 路为青线)。

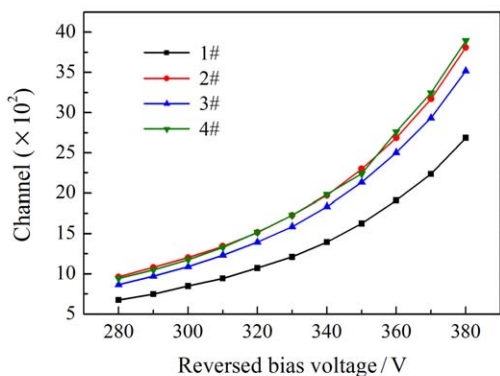


图 4 (在线彩图) 四路信号中 ^{11}C 随偏压升高对应的道数
由于本次实验中数据获取的道数在 0 ~ 4000 道，

当偏压加到 380 V 时， ^{11}C 的探测信号快要超界，其他粒子的探测信号都已经超界，而且本次测试使用的 Si-APD 的击穿电压为 400 V，因此偏压增大到 380 V 就不再增加。

图 5 描述了 CsI 探测器中 Si-APD 暗电流随偏压的变化曲线。对于正常的 Si-APD 来讲，在远离击穿电压时，随着偏压增加，暗电流是基本保持不变或缓慢增加的，当靠近击穿电压时，暗电流大小会发生陡增。从图 5(a) 中可以观察到：在远离击穿电压时，3 路 CsI(Tl) 探测器中 Si-APD 的暗电流大小基本保持不变或小幅度增加，具有良好的暗电流特性。而反观图 5(b) 也可以很清晰地发现，2 号 CsI 探测器中 Si-APD 的暗电流远远大于其他 3 个。因此可以将 2 号 CsI 探测器中 Si-APD 的暗电流与其它 3 组作对比，以研究在相同环境下，不同暗电流大小对探测器性能的影响。

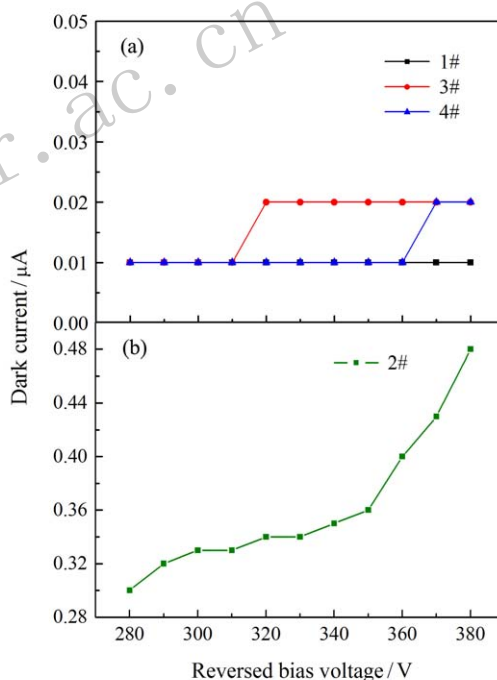


图 5 (在线彩图) 1, 2, 3, 4 号 CsI 探测器中 Si-APD 的暗电流随偏压的变化曲线

(2) 反偏电压对探测器能量分辨率的影响测试

对每个 CsI 探测器中的 Si-APD 施加相同的初始偏压，电压从 280 V 增加到 380 V，以 ^{11}C 的全能峰为例：算出不同电压下，每路信号中 ^{11}C 的能量分辨率。图 6 为反偏电压大小与能量分辨率关系曲线图 (1 号为黑线，2 号为红线，3 号为蓝线，4 号为粉线)。

从图中可看出：随着偏压不断增加，CsI(Tl) 探测器对不同带电粒子的能量分辨变得越来越好。这是因为偏压的增加，使得 Si-APD 中 PN 结的耗尽层宽度变大，

雪崩效应会更加剧烈, Si-APD的放大倍数增大而使得能量分辨变得更好。

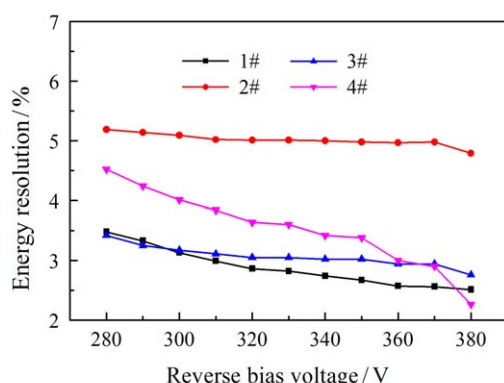


图6 (在线彩图) 4路信号中反偏电压与能量分辨率关系曲线

(3) 暗电流大小对探测器能量分辨的影响测试

为了验证暗电流大小对探测器的能量分辨会产生影响, 接下来对4个CsI(Tl)探测器中Si-APD施加相同的偏压, 4个Si-APD中暗电流(μA)大小分别为: 0.01, 0.60, 0.02, 0.01。每隔一定的时间, 选取一个数据源文件, 共选取10个文件, 计算出每个CsI(Tl)探测器对 ^{11}C 粒子的能量分辨率, 如图7所示(1号为黑线, 2号为红线, 3号为蓝线, 4号为粉线)。

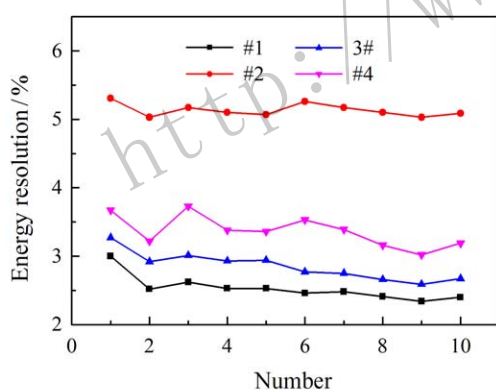


图7 (在线彩图) 选取的文件中每个CsI(Tl)探测器对 ^{11}C 粒子的能量分辨大小

对比图7中4个CsI(Tl)探测器对 ^{11}C 粒子的能量分辨大小, 发现Si-APD中暗电流大的2号CsI(Tl)探测器对 ^{11}C 粒子的能量分辨率差于5%, 而其他3个暗电流小的CsI(Tl)探测器对 ^{11}C 粒子的能量分辨均保持在3%左右。

(4) CsI(Tl)探测器的能量分辨与粒子种类(A, Z)的关系

本次实验中调出的次级束粒子主要有 ^{11}C , ^{12}N , ^{13}O , ^{10}Be , ^{11}B 五种, 对应的能量分别为198.3, 245.1,

297.3, 224.3, 246.7 MeV。4个CsI(Tl)探测器对粒子的能量分辨大小如表1~4所列。

表1 1号CsI(Tl)探测器对粒子的能量分辨测试结果

入射粒子(能量)/MeV	能量分辨率/%
^{11}C (198.3)	2.84
^{12}N (245.1)	2.50
^{13}O (297.3)	2.31
^{10}Be (224.3)	2.61
^{11}B (246.7)	2.36

表2 2号CsI(Tl)探测器对粒子的能量分辨测试结果

入射粒子(能量)/MeV	能量分辨率/%
^{11}C (198.3)	5.31
^{12}N (245.1)	5.13
^{13}O (297.3)	4.81
^{10}Be (224.3)	5.20
^{11}B (246.7)	4.84

表3 3号CsI(Tl)探测器对粒子的能量分辨测试结果

入射粒子(能量)/MeV	能量分辨率/%
^{11}C (198.3)	3.01
^{12}N (245.1)	2.80
^{13}O (297.3)	2.61
^{10}Be (224.3)	2.92
^{11}B (246.7)	2.64

表4 4号CsI(Tl)探测器对粒子的能量分辨测试结果

入射粒子(能量)/MeV	能量分辨率/%
^{11}C (198.3)	3.41
^{12}N (245.1)	3.03
^{13}O (297.3)	2.69
^{10}Be (224.3)	3.32
^{11}B (246.7)	2.98

从以上的4个表中不难发现: CsI(Tl)探测器对带电粒子的能量分辨与粒子的种类(A, Z)没有任何关系, 而与入射粒子的能量大小存在一定的关系, 入射粒子的能量越高, CsI(Tl)探测器对带电粒子的能量分辨也会越好。

6 结论

本次实验主要对CsI(Tl)+Si-APD探测器进行了相关性能测试, 主要有以下几点结论。

(1) 本次实验中首次使用了Si-APD, 来替代之前常用的PMT。测试结果显示: 本次使用的Si-APD具有较低的暗电流噪声, 可以确保探测器处于较高的探

测水平。相比于 PMT, Si-APD 具有量子效率高、响应速度快、体积小、重量轻、功耗低等优点,此外使用 Si-APD 后探测器对带电粒子的能量分辨要更好(之前使用 PMT 时探测器对中能带电粒子的能量分辨只有 4% 甚至更差,而使用 Si-APD 可以达到 3% 左右甚至更好)。

(2) CsI(Tl) 探测器对能量为 20 MeV/u 左右的重带电粒子的能量分辨维持在 3% 左右。CsI(Tl) 探测器中 Si-APD 的暗电流和入射粒子的能量都会对能量分辨产生影响。暗电流越小,暗电流所带来的噪声就越小,此时探测器的信噪比会越大,因此能量分辨也会越好。同样,在闪烁晶体每产生一个光子所消耗的能量不变的情况下,入射粒子的能量越高,闪烁晶体受激而产生的光子数也会越多,因此能量分辨也会越好。

综合以上几点可知:今后在 RIBLL 上开展的各种核反应机制实验,比如:破裂反应、转移反应、敲出反应等等,本次性能测试实验中使用的 CsI(Tl)+Si-APD 探测器在反应产物能量测量和粒子鉴别等方面都可以得到很好的应用。

参考文献:

- [1] CHEN Xiaoshuang, XU Jiao, HU Weida, *et al.* Infrared Technology, 2015, **37**(5): 353. (in Chinese)
(陈效双, 许娇, 胡伟达, 等. 红外技术, 2015, **37**(5): 353.)
- [2] YONG Chaoliang, DUAN Dong, XU Chun, *et al.* Infrared Technology, 2012, **34**(4): 196. (in Chinese)
(雍朝良, 段东, 许春, 等. 红外技术, 2012, **34**(4): 196.)
- [3] CUI Wenkai. Study of The Novel Mesa Structure Avalanche Photodiode Based on Silicon[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2014. (in Chinese)
(崔文凯. 新型台面结构硅基雪崩光电二极管的研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2014.)
- [4] WANG Zhiwei. The Study of Structural Optimization on Reducing The Dark Current of Si-Based Micro-Pixel Array APD[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014. (in Chinese)
(王志伟. 降低硅基微元阵 APD 暗电流结构优化的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.)
- [5] NIE Pengxuan, ZHENG Tao, ZHU Zhaowen, *et al.* Nuclear Electronics&Detection Technology, 2011, **31**(6): 601. (in Chinese)
(聂鹏煊, 郑涛, 祝兆文, 等. 核电子学与探测技术, 2011, **31**(6): 601.)
- [6] YAO Xiangwu, YANG Yanyun, WANG Jiansong, *et al.* Atomic Energy Science and Technology, 2010, **44**(3): 358. (in Chinese)
(姚向武, 杨彦云, 王建松, 等. 原子能科学技术, 2010, **44**(3): 358.)
- [7] WU Dapeng, ZHANG Xueheng, YANG Yanyun, *et al.* Nuclear Techniques, 2009, **32**(7): 550. (in Chinese)
(武大鹏, 章学恒, 杨彦云, 等. 核技术, 2009, **32**(7): 550.)
- [8] SONG Hailan, HUANG Hui, CUI Xuelin, *et al.* Semiconductor Optoelectronics, 2010, **31**(5): 702. (in Chinese)
(宋海兰, 黄辉, 崔海林, 等. 半导体光电, 2010, **31**(5): 702.)
- [9] FAN Ruirui, CHEN Ruofu, XU Hushan, *et al.* Nuclear Techniques, 2007, **30**(6): 507. (in Chinese)
(樊瑞睿, 陈若富, 徐珊珊, 等. 核技术, 2007, **30**(6): 507.)

Performance Test of the CsI(Tl)+Si-APD Detector

JIAO Lei^{1,2}, JIN Shilun², LI Jiaying^{3,†}, WANG Jiansong², YANG Yanyun², MA Peng², MA Junbing²,
BAI Zhen², LIU Xingquan², ZHOU Jiren¹, DUAN Fangfang³, ZHANG Xing³

(1. College of Power Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China;

2. Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;

3. Institute of Physical Science and Technology, Southwest University, Chongqing 400715, China)

Abstract: In this paper, the working principle of Si-APD was introduced and the dark current of Si-APD was analyzed theoretically. The intermediate energy heavy ions, which are produced on the RIBLL(Radioactive Ion Beam Line in Lanzhou), were measured with CsI(Tl)+Si-APD detector. The energy resolution of CsI(Tl)+Si-APD detector is about 3% for heavy ions with energy around 20 MeV/u. It is also found that the energy resolution of detector can be influenced by the dark current of Si-APD and the energy of incident particles.

Key words: dark current; CsI(Tl); Si-APD; energy resolution

Received date: 24 Jun. 2016 Revised date: 24 Oct. 2016

Foundation item: National Natural Science Foundation of China(U1432247, U1332126, 11075133, 11575256, 10205019); National Basic Research Program of China(2014CB845405); CAS "Light of West China" Program([2015]90)

† Corresponding author: LI Jiaying, E-mail: 48124623@qq.com.