

文章编号 1004-924X(2015)02-0402-06

## X 射线脉冲星导航探测器的微通道板甄选

宋娟<sup>1,2\*</sup>, 赵宝升<sup>1</sup>, 盛立志<sup>1</sup>, 刘哲<sup>1</sup>, 刘永安<sup>1</sup>

(1. 中国科学院西安光学精密机械研究所瞬态光学与光子技术国家重点实验室, 陕西西安 710119;  
2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:**根据应用于 X 射线脉冲星导航系统的大面阵 X 射线探测器对微通道板(MCP)性能的要求,研究了甄选微通道板的方法。确定了甄选微通道板的 4 个关键参量,分别是增益的均匀性、阻抗匹配、暗计数率、增益系数。针对这 4 个参量设计了相应的测试实验,制定了甄选 MCP 的流程,并对采用该流程甄选出的 MCP 进行了幅值和计数率的测试。测试结果显示:采用单通道阳极接收信号时,每一个探测单元的幅值存在的相对误差各不相同,第  $i$  个探测单元输出的信号幅值的最大相对误差  $\Delta_{1i}$  和最小相对误差  $\Delta_{2i}$  的波动分别为  $7\% \sim 13.5\%$ ,  $3\% \sim 6.7\%$ ;而采用四通道共享阳极时输出信号的  $\Delta_{1i}$  为  $7.8\%$ 、 $\Delta_{2i}$  为  $3.1\%$ ;单通道阳极计数率之和( $n = n_1 + n_2 + n_3 + n_4$ )与四通道共享阳极计数率  $N$  的相对误差为  $4.38\%$ , 小于预估值  $10\%$ 。上述实验结果表明该甄选方法能够甄选出满足探测器要求的 MCP。

**关键词:**单光子探测; X 射线探测器; 脉冲星导航系统; 微通道板(MCP); MCP 甄选; 脉冲幅值; 计数率

**中图分类号:** TN223; TL816.1 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20152302.0402

## Selection of MCP for array X-ray pulsar navigation detector

SONG Juan<sup>1,2\*</sup>, ZHAO Bao-sheng<sup>1</sup>, SHENG Li-zhi<sup>1</sup>, LIU Zhe<sup>1</sup>, LIU Yong-an<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Transient Optics and Photonics, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China;  
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

\* Corresponding author, E-mail: a19840308@126.com

**Abstract:** According to the demands of an array detector in the X-ray pulsar navigation system for Micro-channel Plate(MCP), a selection method for the MCP was explored. Four key parameters for the selection of MCPs, the uniformity of gain, impedance matching, dark count rate and the gain coefficient were determined. Based on the four key parameters, corresponding experiments were designed and the selection process of MCPs was set out. The amplitudes and counting rates of MCPs selected by proposed method were tested. The tested results show that the relative error of each detection unit is not identical. When a single channel anode is used, the ranges of the maximum relative error  $\Delta_{1i}$  and minimum relative error  $\Delta_{2i}$  of the amplitudes for output signals from the  $i$ th anode are  $7\% - 13.5\%$  and  $3\% - 6.7\%$ , respectively, and when a four-channel anode is used,  $\Delta_{1i}$  and  $\Delta_{2i}$  are  $7.8\%$  and  $3.1\%$ , respectively. Moreover, the relative error between the anode count rate  $n_1 + n_2 + n_3 + n_4$  from

收稿日期:2014-06-16;修订日期:2014-08-01.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 11103069)

the single channel and  $N$  from the four-channel shared anode is 4.38%, less than 10%. Obtained results indicate that the MCPs with good performance have been effectively chosen by the proposed selection method.

**Key words:** single photon detection; X-ray detector; pulsar navigation system; Microchannel Plate (MCP); MCP selection; pulse amplitude; count rate

## 1 引 言

X 射线探测器在整个 X 射线脉冲星导航系统中的作用是捕捉脉冲星发出的 X 射线光子并记录每个光子的到达时间。目前,用于 X 射线探测的探测器主要有气体正比计数器、闪烁体探测器、热量计探测器、光电耦合器件、光电耦合器件 (CCD) 探测器、SCD 探测器和微通道板 (Microchannel Plate, MCP) 探测器。其中,基于 MCP 的 X 射线探测器在诸多领域的研究中得到了应用<sup>[1-8]</sup>,它具有寿命长、信噪比高、时间响应快、时间分辨率高等优点,能够满足 X 射线脉冲星导航系统对探测器的要求<sup>[9]</sup>。X 射线脉冲星的能流很弱,因此 MCP 探测器必须具备高的探测效率。探测效率的提高方法主要有增大光电阴极的量子效率、X 射线聚焦<sup>[10-11]</sup>以及探测器的有效接收面积,但单纯地依赖其中的某一种方法不能使探测器的探测效率达到最优,因此在工程中通常将这 3 种方法结合起来应用。

大面阵 MCP 探测器由若干个探测单元组成,为了降低采集电子学的研制难度,需采用多通道共享阳极收集技术,因此要求各个探测单元输出的信号特征相同或者近似相同。为了摆脱国外的技术封锁,必须采用国产的 MCP 研制大面阵 X 射线探测器。不过国产 MCP 虽然生产量很大,但受制作工艺水平的限制,经去噪处理和老化后 MCP 之间的性能参量仍存在较大差别,若不对 MCP 进行甄选必将会导致探测单元输出的信号间存在较大的特征差异,从而无法实现采用多通道共享阳极收集技术降低采集电子学研制难度的方案。为了解决上述矛盾,挑选满足要求的 MCP 成为探测器研制必须解决的问题之一。

本文根据大面阵 X 射线探测器对 MCP 性能的要求,制定了甄选 MCP 的工艺流程及相应参量的测试实验。以  $\Phi 56$  mm、长径比为 40:1 的国产 MCP 为研究对象,采用提出的甄选工艺挑选出 8

块 MCP 应用于实验中,取得了良好的实验效果。

## 2 MCP 的性能要求

### 2.1 增益均匀性的要求

理想情况下,单块 MCP 在各个部分的增益是均匀一致的,检测时在荧光屏上各区域呈现的亮度相同,如图 1 所示。但在实际应用中,同一片 MCP 的不同区域的增益不同,呈现出不均匀的亮斑,如图 2 所示。

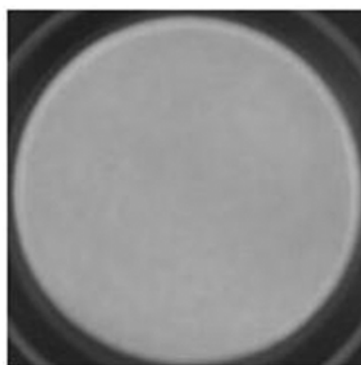


图 1 增益均匀 MCP 呈现的亮斑

Fig. 1 Spot of MCP with homogeneous gain

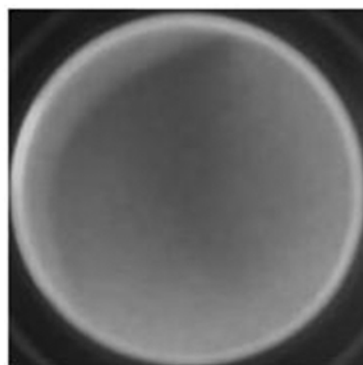


图 2 增益不均匀 MCP 呈现的亮斑

Fig. 2 Spot of MCP with uneven gain

黑暗的区域是增益小的区域,明亮的区域是增益高的区域。由于 MCP 由数百万通道的阵列熔合而成,因此不同区域间在通道直径上存在偏

差。这一偏差致使相应区域间的增益不同,最终导致从不同区域输出的信号强度不同,在成像应用中就形成了输出像的固定图案噪声。最常见的增益不均发生在复丝间的交界处,由于复丝交界处的通道与复丝内部的通道在形状或形成的物理化学过程不完全相同,因而彼此间在增益上有一定的差别,这种现象称为复丝边界噪声<sup>[12]</sup>。该现象对工作在单光子模式下的 MCP 探测器的探测效率影响很大,如果光子事件入射到增益小的区域,有可能会造成有效信号增益过低而被后端采集电子学系统认为是噪声信号而滤除掉,从而降低了探测器的探测效率和可靠性;因此必须对每一块 MCP 的增益均匀性进行测试。实验测试如图 3 所示,X 射线源辐射出的射线入射到 MCP 输入面,产生的光电子经过倍增后轰击荧光屏,通过荧光屏各区域亮斑的分布情况可以直观得到 MCP 的增益是否均匀。

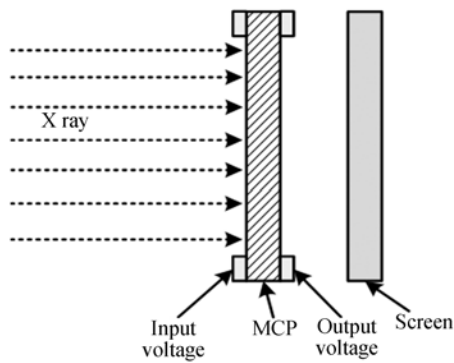
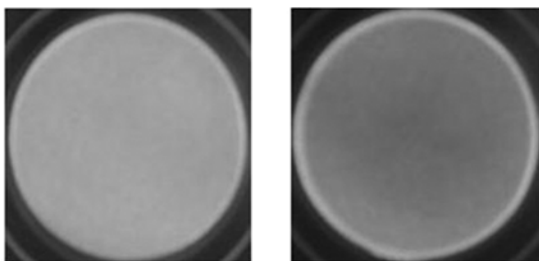


图 3 测试 MCP 均匀性的装置示意图

Fig. 3 Schematic of testing MCP gain uniformity

此外,该测试还可以定性判断 MCP 的增益大小,相同的实验条件下,荧光屏越亮说明增益越高;反之说明增益小。观察到的现象如图 4 所示。



(a)增益高 (b)增益低  
(a) High gain (b) Low gain

图 4 MCP 呈现高度

Fig. 4 Bright spots of MCP

## 2.2 阻抗匹配要求

在单光子计数模式下,单块 MCP 的增益较小,输出的信号很弱,探测效率低,不易被探测。因此将增益均匀性良好的 MCP 分成若干组,每组两块,成“V”字形串联,以提高其增益系数。

两块 MCP 相当于两个串联的电阻,通过一个中间电极导通。施加负的高电压  $-HV$ ,如果二者的阻抗相同或者基本相同则两者分别获得  $-HV/2$  的电压,从而保证两块 MCP 同时获得了足够的工作电压;如果二者的阻抗相差很大,则二者分得的电压也会相差很大,导致一块 MCP 会因为电压过高被击穿,另一块 MCP 会因为工作电压过低而增益很小,不能对入射的电子进行倍增。因此,对 MCP 进行分组时要保证每个探测单元的两块 MCP 阻抗相匹配。该参量一般由厂商提供,也可以自行测试,自行测试必须在真空中进行。

## 2.3 暗噪声要求

暗噪声信号的来源主要是 MCP 自身的暗发射和内部的正离子反馈。通常采用暗电流值这一参量来衡量 MCP 的暗噪声,暗电流越小说明暗噪声越小,暗电流越大说明暗噪声越大。在单光子探测技术背景下,采用暗计数率这一参量来衡量暗噪声更加准确。所谓暗计数率,是指在单光子计数模式下,没有任何光源辐照时,单位时间内采集到的事件个数,暗计数率越小越好。暗计数率的测试如图 5 所示,从探测器输出的原始脉冲信号依次进入到电子学采集系统、数据处理系统,最终获得暗计数率。

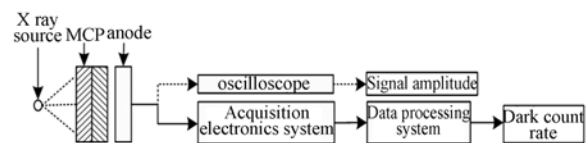


图 5 测试增益大小和暗计数的实验系统示意图

Fig. 5 Experiment system for testing gain and dark count rate of MCP

## 2.4 增益要求

X 脉冲星发射出的周期性信号非常微弱,故导航系统对大面阵 X 射线的探测器要求为:每一个探测单元的 MCP 增益要高,以使探测的目标信号获得足够高的倍增。MCP 是一种真空电子倍增器件,高速电子或者高能光子撞击输入端通

道的内壁时产生次级电子,经过与通道内壁的多次碰撞实现电子雪崩式倍增,最后在 MCP 的输出端输出大量电子<sup>[13-15]</sup>,即电子云团。电子云团被收集阳极接收后产生一个电信号脉冲。增益系数的量化参量是输出原始脉冲信号的幅值,信号幅值越高,说明 MCP 的增益越大;反之说明增益小。具体的计算关系为: $V = \alpha eR$ ,其中  $\alpha$  表示 MCP 的增益系数, $e$  表示电子的电量, $R$  表示与收集阳极阻抗匹配的电阻, $R=50 \Omega$ 。

增益测试系统如图 5 所示。探测器输出信号直接输入到示波器中,示波器工作在单次扫描模式下,通过对幅值进行大量的采集与统计分析,从而获得可靠系数高的增益幅值。

### 3 实验及结果分析

#### 3.1 实验过程

按照图 6 所述的测试流程,从若干 MCP 中甄选出 8 块 MCP,分成 4 组,每一组的两块 MCP 增益均匀、阻抗匹配、暗计数率小于 5 count/s (注:暗计数率指的是每个探测单元的 MCP 的暗计数率,而不是单位面积 MCP 的计数率),增益系数基本相同,分别装配到 22 阵列的结构中进行实验测试,以验证该甄选方法的可行性。

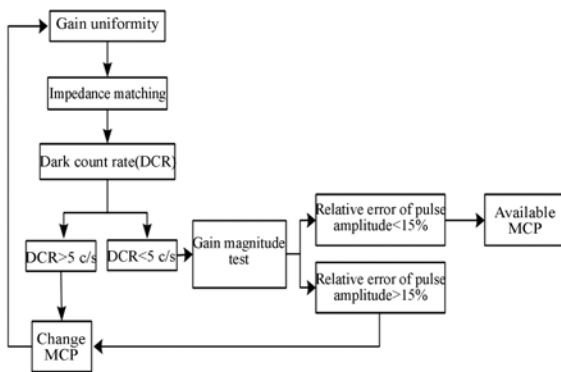


图 6 MCP 甄选流程图

Fig. 6 Flow chart of MCP selection method

首先,采用微带线阳极收集信号,测得每一个探测单元的暗计数率和脉冲幅值( $i$  表示微带线阳极的编号,对单通道阳极  $i=1,2,3,4$ ;对应的计数率为  $n_1, n_2, n_3, n_4$ ,脉冲幅值为  $a_1, a_2, a_3, a_4$ );然后 4 个探测单元共用一个 4 通道共享阳极收集信号,测得一个暗计数率  $N$  和脉冲幅值  $A$ 。

单通道阳极和四通道共享阳极实物如图 7 所示。

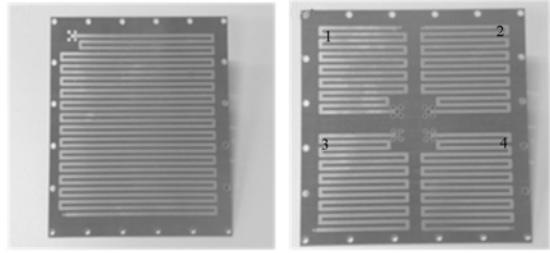


图 7 (a)单通道阳极,(b)四通道共享阳极

Fig. 7 (a)Single-channel anode;(b)Four-channel shared anode

(1)在采集电子学阈值很低的情况下,一段时间内采集到的信号幅值  $a_i(i=1,2,3,4)$  的最大相对误差小于 10%,说明 MCP 输出的信号幅值很稳定,间接验证了每个探测单元的 MCP 在各个区域的增益均匀性良好。(2)对比 4 个探测单元的输出信号,如果它们具有相同或者相近的幅值  $a_1 \approx a_2 \approx a_3 \approx a_4$ ,说明甄选出的每一组 MCP 对信号有相近的增益系数。(3)每个探测单元的暗计数率小于 5 count/s。如果同时满足(1)、(2)、(3)和  $N \cong n_1 + n_2 + n_3 + n_4$  这 4 个条件则判定 4 个探测单元输出的信号特征是一致的,即甄选的 MCP 能够满足 X 射线脉冲星导航系统对探测器的要求。

#### 3.2 实验结果

采用单通道阳极接收信号时,若干次幅值取平均值后分别为: $a_1 = 21.3 \text{ mV}$ 、 $a_2 = 24.3 \text{ mV}$ 、 $a_3 = 26.6 \text{ mV}$ 、 $a_4 = 27.6 \text{ mV}$ ,4 个探测单元输出的信号幅值近似,这表明增益系数相近。

$\Delta V_{\max i}$  表示第  $i$  个探测单元输出信号幅值的最大偏差值, $\Delta V_{\min i}$  表示第  $i$  个探测单元输出信号幅值的最小偏差值, $\Delta_{1i}, \Delta_{2i}$  分别表示第  $i$  个微带线输出信号的最大相对误差和最小相对误差。对获取的幅值数据进行如下处理:

$$\Delta_{1i} = (V_{\max i} - V_{\text{av}}) \div V_{\text{av}}, \quad (1)$$

$$\Delta_{2i} = (V_{\min i} - V_{\text{av}}) \div V_{\text{av}}, \quad (2)$$

$$V_{\text{av}} = \frac{V_1 + V_2 + V_3 + \dots + V_n}{n}. \quad (3)$$

由表 1 可知,4 个探测单元的幅值存在的相对误差各不相同, $\Delta_{1i}, \Delta_{2i}$  的波动分别为 7% ~ 13.5%,3% ~ 6.7%,采用四通道共享阳极时输出信号的  $\Delta_{1i} = 7.8\%$ , $\Delta_{2i} = 3.1\%$ ,在允许的误差范围内,可以忽略不计。实验结果证明:甄选出的 MCP 的增益均匀性良好。

表 1 脉冲幅值相对误差

Tab. 1 Relative errors of pulse amplitude (%)

通道序号	单通道阳极脉冲幅值相对误差	四通道共享阳极脉冲幅值相对误差
1	$\Delta_{11}=7$ $\Delta_{21}=3$	
2	$\Delta_{12}=8.9$ $\Delta_{22}=4.5$	$\Delta_{11}=7.8$
3	$\Delta_{13}=13.5$ $\Delta_{23}=6.7$	$\Delta_{21}=3.1$
4	$\Delta_{14}=10.3$ $\Delta_{24}=3.5$	

在无源照射条件下,测试了每一个探测单元的暗计数率,暗计数率皆小于 5 count/s,满足暗计数率的要求。有源照射时,在相同源强下对计数率  $n_1, n_2, n_3, n_4, N$  进行了若干次的采集并取平均值,以消除由源扰动产生的计数率误差,如表 2 所示。相对于 3,4 两个探测单元,在相同的工作电压下,1,2 两个探测单元并没有达到最佳的工作状态,导致输出的信号幅值和计数率偏小。在相同的实验条件下,单通道阳极的计数率之和  $n_1 + n_2 + n_3 + n_4$  大于四通道共享阳极的计数率  $N$ ,二者之间的相对误差为 4.38%,小于预估值 10%,能够满足需求。产生计数率误差的原因是采用四通道共享阳极时电子学部分只有一个通道,电子学采集阈值只有一个,增益较小的 1,2 号探测单元输出的一部分有效信号被滤除了。

#### 参考文献:

- [1] 成金秀,温天舒,朱宗元,等. MCP 选通 X 射线皮秒分幅相机研制进展[J]. 光学精密工程,1996,4(1): 44-48.  
CHENG J X, WEN T SH, ZHU Z Y, *et al.*. Developing progress of multiframe gated microchannel plate X ray camera[J]. *Opt. Precision Eng.*, 1996, 4(1):44-48. (in Chinese)
- [2] 李敏,范鲜红,尼启良,等. 微通道板在 12~40 nm 波段的量子效率测量[J]. 光学精密工程,2008,16(1):1-5.  
LI M, FAN X H, NI Q L, *et al.*. Quantum efficiency of microchannel plate in 12~40 nm[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008,16(1):1-5. (in Chinese)
- [3] 潘京生,吕景文,李燕红,等. 无膜微通道第三代像

上述实验结果表明:选出的 MCP 输出信号特征近似,可以用于大面阵 MCP 探测器。

表 2 计数率测试数据

Tab. 2 Count rate data (count/s)

通道序号	单通道阳极计数率	四通道共享阳极计数率
1	$n_1=117$	$N=938$
2	$n_2=242$	
3	$n_3=220$	
4	$n_4=402$	
Total	$n_1 + n_2 + n_3 + n_4 = 981$	$N = 938$

## 4 结 论

本文从 X 射线脉冲星导航探测器对 MCP 的性能要求出发,确定了甄选所需 MCP 的 4 个关键参量,并设计了相应的实验测试方案。根据制定的 MCP 甄选实验流程,完成了 MCP 的甄选。采用单通道阳极接收信号时,  $\Delta_{1i}, \Delta_{2i}$  波动分别在 7%~13.5%, 3%~6.7%;采用四通道共享阳极时输出信号  $\Delta_{1i}=7.8\%$ 、 $\Delta_{2i}=3.1\%$ ;单通道阳极计数率之和  $n_1 + n_2 + n_3 + n_4$  与四通道共享阳极计数率  $N$  的相对误差为 4.38%,而未经过甄选的 MCP 探测单元之间的  $\Delta_{1i}, \Delta_{2i}$  波动分别在 12%~45.1%, 14.3%~37.1%。测试结果表明,所甄选出的 MCP 能够满足要求,甄选方案切实可行。

增强器的可行性及技术途径探究[J]. 光学学报, 2012,32(3):0323005-1-6.

PAN J SH, LÜ J W, LI Y H, *et al.*. Exploring the feasibility and approach for unfilmed-microchannel-plate based third generation image intensifiers[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(3): 0323005-1-6. (in Chinese)

- [4] LOENEY D P, HEIMANN P A, PADMORE H A, *et al.*. Characterization of CsI photocathodes at grazing incidence for use a unit quantum efficiency x ray streak camera[J]. *SPIE*, 2004, 5194:139-148.
- [5] ZHENG Y, PENG Z, BO D, *et al.*. Spectral sensitivity calibration of Au and CsI photocathodes of high speed X ray scanning camera[J]. *SPIE*, 2012, 8419:841921-1.
- [6] 尼启良,韩素立,陈斌,等. 球面微通道板在极紫外波段的量子探测效率[J]. 光学精密工程,2011,19

- (11):2596-2601.
- NI Q L, HAN S L, CHEN B, *et al.*. Quantum detection efficiency of spherical microchannel plate in extreme ultraviolet[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(11):2596-2601. (in Chinese)
- [7] 黄宇, 张晓芳, 俞信. 光子成像静止点目标的管道滤波探测方法[J]. *中国光学*, 2013, 6(1):3-79.  
HUANG Y, ZHANG X F, YU X. Pipeline filtering detection of stationary point targets in photon images [J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(1):73-79. (in Chinese)
- [8] 卜绍芳, 尼启良, 何玲平, 等. 极紫外波段微通道板光子计数探测器[J]. *中国光学*, 2012, 5(3):302-309.  
BU SH F, NI Q L, HE L P, *et al.*. Microchannel plate photon counting detector in UV range [J]. *Chinese Optics*, 2012, 5(3):302-309. (in Chinese)
- [9] 胡慧君, 赵宝升, 盛立志, 等. 基于 X 射线脉冲星导航的地面模拟系统的研究[J]. *物理学报*, 2011, 60(2):029701.  
HU H J, ZHAO B SH, SHENG L ZH, *et al.*. A simulation experiment system for X ray pulsar based navigation [J]. *Acta Phys. Sin.*, 2011, 60(2):029701. (in Chinese)
- [10] ZHANG W W. Light weight and high angular resolution X-ray optics for astronomy [J]. *SPIE*, 2011, 807602:1-11.
- [11] HUANG Q SH, LI H CH, TAO J, *et al.*. Grazing incidence telescopes for x-ray astronomy [J]. *Optical Engineering*, 2012, 51(1):011010-1-13.
- [12] 潘京生. 微通道板及其主要特征性能[J]. *应用光学*, 2004, 25(5):25-29.  
PAN J SH. Microchannel plates and its main characteristics [J]. *J. Applied Optics*, 2004, 25(5):25-29. (in Chinese)
- [13] BAUMER M, DAI ZH T. Anode readouts [R]. *LAPD Collaboration Meeting*, ANL, 2009.
- [14] SCHLETTI R, WURZ P, SCHERER S, *et al.*. Fast microchannel plate detector with an impedance matched anode in suspended substrate technology [J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 2001, 72(3):1634-1639.
- [15] PETER W, LUKAS G. Impedance-matching anode for fast timing signals [J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 1994, 65(4):871-876.

## 作者简介:



宋娟(1984—),女,山东青岛人,博士研究生,2011年于西安石油大学获得硕士学位,主要从事 X 射线单光子探测方面的研究。E-mail: a19840308@126.com

## 导师简介:



赵宝升(1959—),男,陕西商洛人,学士,研究员,1983年于西安交通大学获得学士学位,主要研究方向光电子器件。E-mail:open@opt.ac.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)