

文章编号 1004-924X(2015)03-0660-07

应用于中子照相的热中子敏感微通道板

潘京生*, 顾 燕, 孙建宁, 苏德坦, 陆 强
(北方夜视技术股份有限公司, 江苏 南京 211102)

摘要:介绍了中子成像探测技术的应用。由于直接在微通道板(MCP)玻璃中掺加中子灵敏核素可使 MCP 对热中子敏感,从而可将 MCP 事件计数成像探测器的优势成功地应用于以中子为探针的成像探测技术,本文开展了热中子敏感微通道板的研究。通过在 MCP 玻璃中掺摩尔百分比为 3%的 Gd_2O_3 ,并沿用 MCP 的制作方法,完成了直径为 50 mm 和 106 mm 的大面阵热中子敏感 MCP 的制作,并进行了基于这种大面阵热中子敏感 MCP 的中子事件计数成像探测器的中子成像实验。理论和实验结果都验证了掺摩尔百分比为 3%的 Gd_2O_3 MCP 可取得对热、冷中子 30%~50%的探测效率。最后,进一步介绍了目前开展的封装式中子敏感 MCP 增强管的研制工作。基于掺 Gd_2O_3 的 MCP 增强管并经光学耦合到 CCD 或 CMOS 相机的紧凑混合传感器结构是实现高时空分辨能力的中子照相无损检测技术的有效途径。

关键词:中子照相;中子相机;中子敏感微通道板;增强 CCD;增强 CMOS-APS

中图分类号:TL816.3;TN151.1 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20152303.0660

Thermal neutron sensitive MCPs for neutron radiograph

PAN Jing-sheng*, Gu Yan, SUN Jian-ning, SU De-tan, LU Qiang

(North Night Vision Technology Corporation, Ltd., Nanjing 211102, China)

* Corresponding author, E-mail: jspanl30@sina.com

Abstract: The applications of neutron radiograph were introduced. As adding directly neutron-absorbing atoms into Micro-channel Plate(MCP) glass would make the MCP sensitive to neutrons, and the advantages of a MCP event counting imaging detector would be successfully extended to the imaging detection technologies, this paper explores the thermal neutron sensitive MCPs. By adding directly 3 mol% $^{nat}Gd_2O_3$ into MCP glass composition and using a conventional fabrication process, the large format neutron-sensitive MCPs with diameters of 50 mm and 106 mm were fabricated and the high efficiency event-counting thermal neutron imaging experiments were completed by using this Gd doped neutron-sensitive MCPs. The theory and experiments verify that this 3 mol% $^{nat}Gd_2O_3$ doped neutron-sensitive MCP realizes the detection efficiency of 30%—50% for thermal imaging or cold neutrons. This work now is further proceeding to develop a sealed neutron sensitive MCP intensified tube, because the compact neutron camera based on a hybrid sensor configure via optical couple to a CCD or a CMOS camera is a promising approach to high temporal and spatial resolution neutron radiographic nondestructive test technology.

Key words: neutron radiograph; neutron camera; neutron sensitivity Micro-channel Plate(MCP); intensified CCD; intensified CMOS-APS

收稿日期:2014-08-04;修订日期:2014-09-30.

基金项目:国家自然科学基金面上项目(No. 11075026, No. 61275152)

1 引言

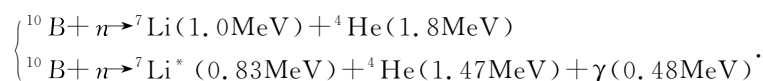
在凝聚体物理学、材料科学和工程、地球科学以及生物科学等多个基础科学领域,中子成像已成为一种有效的探测方式。中子相互作用概率与核结构的相关性决定了不同材料对中子的吸收系数经常有着数量级的差别,因此中子成像可获得更高的分辨力和灵敏度,而通过中子计算机断层成像进一步保留中子吸收的空间分布信息,对其物理结构按照实际的空间相对位置和方向进行可视化成像,有助于理解材料缺陷发展和器件失效的基本机制^[1-4]。

热中子照相已成为对复杂物品和结构进行无损检测(NDT/NDE)的一个重要工具。中子对轻物质有较好的灵敏度,并可穿透一些常见的高、中Z材料(如铅、铁)来检查被遮盖住的物体。在检测含氢材料、重金属组件、原子序数相近的材料、复合材料、放射性材料,特别在金属背景下测量渗水、渗油以及导火索的缺陷等方面,中子照相独具优势,可弥补X射线照相和 γ 照相等其它无损检测技术的不足,因而在火工品检测、飞机关键部位照相、生物成像、核燃料检查、爆炸物检测、考古学研究和精确的中子束监测等领域有着重要的应用。

改进中子探测器还可以显著提升应用于反应堆和中子散射装置的仪器性能。目前广泛采用的 ^3He 气体正比中子计数器,正面临 ^3He 资源严重匮乏的危机,为此也急需开发新的探测介质^[5]。

微通道板(Micro-channel Plate, MCP)事件计数成像探测器已广泛应用于紫外光(UV)和X射线的成像探测。但传统MCP基体中并不含有中子灵敏核素,通过在MCP玻璃成份中引入中子灵敏核素,使MCP对中子敏感,可将MCP探测器在空间和时间分辨力上的优势成功地拓展到以热中子为探针的计数成像探测应用中^[6]。

2000年在加州大学伯克利分校与Nova Scientific Inc的合作下,Feller等人最早实现了掺 ^{10}B 或Gd的中子敏感MCP^[7],基于这种中子



α 粒子和 ^7Li 荷能粒子以相反方向发射,在MCP玻璃中的移动距离分别约为 $3.5\ \mu\text{m}$ 和 $2\ \mu\text{m}$ ^[16]。MCP壁厚通常为 $2\sim 3\ \mu\text{m}$,一些粒子在MCP玻璃壁中被吸收,但多数可从通道壁中

敏感MCP的热中子计数成像探测器达到了50%的热中子探测效率,优于 $20\ \mu\text{m}$ 半高全宽(FWHM)的空间分辨力,约 $1\ \mu\text{s}$ 的时间分辨力和 $0.1\ \text{event}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$ 的暗计数率^[8-9];并且通过采用有效的中子伽马甄别方法,具备替代传统 ^3He 气体中子计数管的潜力^[10]。中子敏感MCP还可作为中子准直器,在两个维度上准直中子束的结构,使中子敏感MCP在mm级厚度实现紧凑高效的中子准直效果^[11-12]。目前,Nova与Proxivision联合已推出了基于热中子敏感MCP增强器的紧凑式中子相机。

同时,该项研究也已经在国内得到开展。北方夜视技术股份有限公司已经研发出掺摩尔百分比为3% Gd_2O_3 的大面阵热中子敏感MCP,并由清华大学合作课题组在基于该热中子敏感MCP的事件计数成像探测器上实现了50 mm和100 mm直径面阵的热中子成像,得到了最大可达50%的热中子探测效率、 $60\ \mu\text{m}$ (FWHM)的空间分辨力和低至 $0.11\ \text{event}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$ 的暗计数率^[13-15]。目前,北方夜视技术股份有限公司也已着手开发中子敏感MCP增强器,以实现基于封装式热中子敏感MCP增强管的紧凑式中子相机,从而为中子照相技术提供一种紧凑便携的高分辨力、高探测效率的探测器。

2 热中子敏感MCP

2.1 热中子敏感MCP及其探测效率的预估

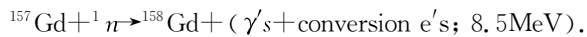
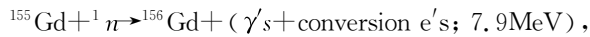
将对低能中子具有高相互反应截面的 ^{10}B 和 $^{155,157}\text{Gd}$ 结合进入MCP玻璃,它们与中子相互反应的产物从通道壁上逸出并产生电离,从而使MCP对热中子敏感,这是将MCP拓展应用到以中子为探针的计数成像探测中的最简便方法。

在一个掺B玻璃的中子灵敏MCP中,中子被MCP基体玻璃中的 ^{10}B 原子所俘获后诱发的 $^{10}\text{B}(n, \alpha)^7\text{Li}$ 反应如下:

逸出,并激发至少一个通道至多两个相邻通道,高概率起始一个电子雪崩,中子事件可基本限定在单个通道之内。

$^{155,157}\text{Gd}$ 俘获中子后得到 $^{155,157}\text{Gd}(n, \gamma)^{156,158}\text{Gd}$,

该反应导致复杂的 γ 光子和内转换电子能谱为:



内转换电子(及随后可能的俄歇电子)的能量主要在 29~181 keV^[17],它在 MCP 玻璃中最大可能的距离为 14~15 μm ^[18],对于一个 10 μm 孔径、12 μm 孔间距的 MCP,中子事件仍然可定位于相邻的 2 到 3 个通道中,但 MCP 无法有效阻止 γ 光子穿越多个通道,这可能会对空间分辨力造成一定的影响。

中子敏感 MCP 的探测效率等于其基体组份中掺杂核素对中子的吸收效率,其反应产物至少有一个带电粒子能够逸出进入相邻通道开口的概率,及这个反应产物进入相邻通道后能形成一个电子雪崩并被外面电路测量到的概率之积。

中子吸收效率取决于所掺核素的反应截面及其在基体中的数量密度以及 MCP 的有效玻璃比,MCP 玻璃壁对中子的吸收概率为^[14]:

$$P_{\text{absorb}} = 1 - \exp(-L_{\text{eff}} \sum N_i \sigma_i), \quad (1)$$

其中: N_i 是 MCP 基体单位体积中的中子吸收核素原子 i 的数量, σ_i 是该原子的中子俘获反应截面, L_{eff} 是中子轨迹在 MCP 结构中的有效路径。而穿越通道开口的部份对吸收并没有贡献。

单位体积掺杂核素的原子数量为^[12]:

$$N_i = 2 \frac{\rho_{\text{glass}} \times a_i m_i \mu_i}{M_i \sum_n M_n \mu_n}, \quad (2)$$

式中: ρ_{glass} 是玻璃密度, a_i , μ_i 和 m_i 分别是相应核素的丰度、其氧化物分子量和摩尔百分比, M_n 和 μ_n 分别是玻璃组成物的分子量和摩尔百分比。

中子俘获反应截面 σ 是中子能量的关系式。 ^{10}B 对于 0.025 eV 的热中子的捕获截面为 3 837 b,天然丰度为 19.9%, (n, α) 反应产物从通道逸出放出带电粒子的概率 $P_{\text{ne}} = 1$ 。 ^{155}Gd 和 ^{157}Gd 对 0.025 eV 的热中子俘获截面分别为 61 000 b 和 259 000 b,天然丰度分别为 14.8% 和 15.7%,相当于每个 Gd 原子核的热中子俘获截面为 49 000 b, (n, γ) 反应具有很高的内转换概率,平均每次中子吸收会伴随 0.875 个电子出射^[19]。即使考虑内转换电子和俄歇电子的级联关系,每次中子吸收也有 0.65 个电子产生^[17]。

0.025 eV 的热中子在一个掺杂摩尔百分比为 3%^{nat} 的 Gd_2O_3 MCP 基体中的穿越路径若达到 0.6 mm 即可几乎被完全吸收,1 片掺杂摩尔百分比为 3%^{nat} 的 Gd_2O_3 、有效玻璃面积为 40%、厚度

为 0.6 mm 的无斜切角 MCP,对于近垂直入射的热中子束(即通道垂直于 MCP 输入面,入射中子在通道中传输而不撞击通道壁)的探测效率可达到 34%。通过优化 MCP 通道的几何结构,增加中子在 MCP 基体中的有效路径,可以提高对中子的吸收效率,掺 3 mol% Gd_2O_3 MCP 的热中子探测效率理论上最高可达到 50%^[13-14]。

由于 ^{157}Gd 具有非常大的中子俘获截面,因此掺 ^{nat} Gd_2O_3 比掺浓缩 $^{10}\text{B}_2\text{O}_3$ 更有效。理论上,MCP 掺 3%^{nat} (摩尔百分比) Gd_2O_3 时的探测效率相当于甚至优于掺杂 20% (摩尔百分比) 的 $^{10}\text{B}_2\text{O}_3$ 。尽管 B_2O_3 可以大量地掺入 MCP 玻璃,但试验制作的掺 20 mol% B_2O_3 的 MCP 已难进行 MCP 制作过程中所必须的化学腐蚀处理,无法制作成通道阵列结构完整的 MCP^[13]。

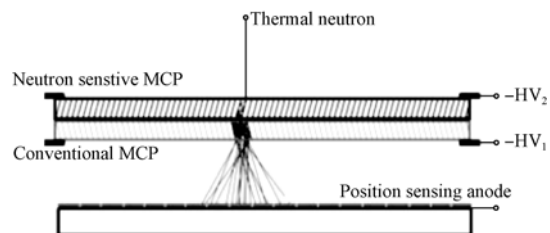
2.2 基于热中子敏感 MCP 的中子成像

基于掺摩尔百分比为 3%^{nat} 的 Gd_2O_3 的 10 μm 孔径,50 mm 和 106 mm 的大面阵中子敏感 MCP 的热中子成像实验,已由清华大学合作课题组在其研制的基于 MCP 事件计数探测器的中子成像探测系统上完成。实验采用了开放式法兰盘结构的 MCP 事件探测器,在这种探测器中,基于 MCP V stack 和位置灵敏阳极(WSA 或交叉延迟线)的 MCP 事件计数探测器被装配在一个法兰盘上,然后再将它装配进一个与真空系统连接的真空腔体内,如图 1 所示。在工作状态下真空系统始终保持工作,以确保 MCP 稳定工作。



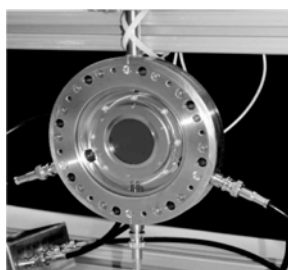
(a) 50 mm 直径掺 Gd 中子的敏感 MCP

(a) Gd doped MCP with 50 mm diameter



(b) 中子计数成像探测器的原理

(b) Schematic diagram of neutron counting imaging detector



(c) 开放式中子灵敏 MCP 成像探测器

(c) Open neutron sensitive MCP imaging detector



(d) 中子成像探测系统

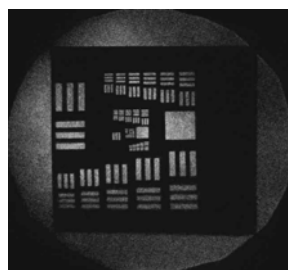
(d) Neutron imaging detection system

图1 基于法兰结构中子敏感 MCP 探测器的中子成像系统

Fig. 1 Neutron imaging system based on open neutron sensitive MCP imaging detector

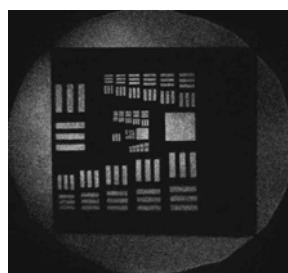
MCP 事件计数成像探测器是对微弱辐射物成像探测的最好方法。当给 MCPV stack 施加一个高电压,使 MCPV stack 的级联增益指数增加并达到空间电荷饱和,对每一个事件都产生恒定振幅的输出脉冲,结合一个位敏阳极读出和一个数字处理单元,分析每一个输出脉冲,确认事件真实,并计算相对应的位置坐标,对事件进行空间位置的二进制计数,从而实现了对极微弱辐射物如单光子事件的脉冲计数成像探测^[20]。

图2是清华大学研制的106 mm直径大面阵中子敏感 MCP 探测器分别在 X 射线辐射源和清华大学的微型脉冲强子源(CPHS)上对 USAF 分辨力靶的 X 射线成像和中子成像。MCP 可直接探测极紫外(EUV)光子和 X 射线,因此基于中子敏感 MCP 的中子成像探测器实际上是一个极紫外和 X 射线成像探测器。由于成像的中子事件率远低于 X 射线事件率,在中子成像上呈显出由 MCP 缺陷导致的微弱发射所累积形成的亮点。



(a) 对 USAS 分辨力靶的 100 mm 直径 X 射线成像

(a) X-ray radiograph for USAS resolution target



(b) 对 USAS 分辨力靶的 100 mm 直径中子成像

(b) Neutron radiograph for USAS resolution target

图2 中子计数成像探测器的 X 射线成像和中子成像

Fig. 2 X-ray radiograph and neutron radiograph of neutron counting imaging detector

基于中子敏感 MCP 事件计数探测器的中子成像系统实现了 40 mm 和 100 mm 的大面阵热中子事件计数成像,对 0.25 eV 热中子的探测效率为 30%~50%,同时探测器的暗计数率低至 0.11 event/(cm²·s),分辨力达到 60 μm。

3 基于 MCP 增强器的中子相机

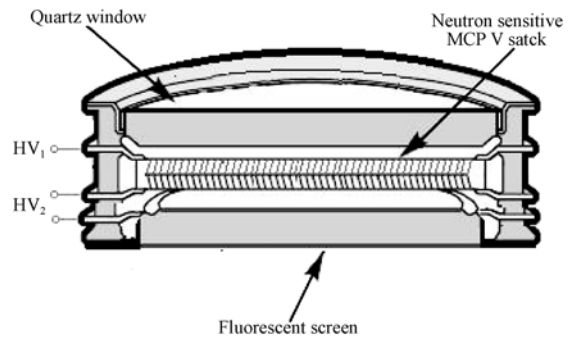
基于位敏阳极直接电荷读出的封装管式 MCP 事件计数探测器不仅可达到与增强型电荷耦合器件(ICCD)相匹敌的空间分辨力^[21],而且具有更高的时间分辨力。将基于中子敏感 MCP 增强器经光学耦合到 CCD 或 CMOS 相机的混合传感器结构,可利用现有的 MCP 增强器制造技术来完成,是实现紧凑型中子相机一个切实有效的途径。

中子灵敏 MCP 的热中子探测效率与³He 气体管的相当,但却难以摆脱固体中子探测器所具有更高的 γ 射线吸收,而采用封装管结构的紧凑型热中子探测器,可为 n/γ 甄别技术提供更多有效的技术途径^[22]。

微光像增强管实质上是将制作有光阴极的输入窗、MCP 和制作有荧光屏的纤维光学输出窗封装到一个由氧化铝陶瓷和可伐钎焊制成的真空腔体中。现代像增强器常采用紧凑轻薄的双近贴结构,在像增强器技术上发展起来的 ICCD 使 MCP 像增强器具备了紧凑的数字化集成能力,而光子计数 ICCD 使 MCP 光子计数探测器的结构更加紧凑,便于轻型化和小型化。在光子计数 ICCD 中,由光阴极和 MCPV stack 探测的单个事件所产生的输出电子脉冲,在像增强器的荧光屏上被转换成为一个可见光亮点,当 MCPV stack 工作于饱和状态,每一个事件在荧光屏上所产生的亮点亮度相等,CCD 电子读出每一帧图像,同样采用一个数字处理单元分析每一帧图像并确认真实事件,同时运行一个对光点覆盖区域的矩心坐标算法,每个事件的矩心定位可精确到亚通道精度^[23],最后累积成图像。

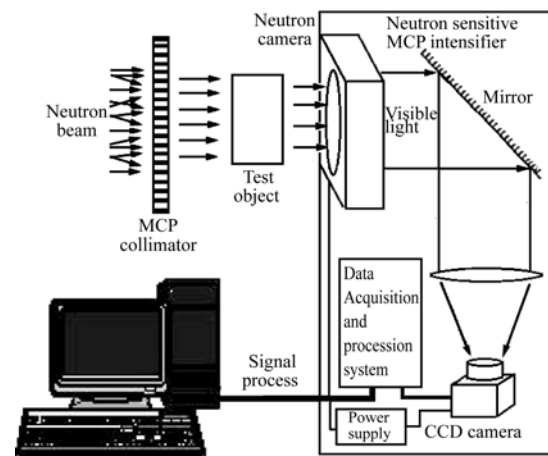
中子敏感 MCP 首先被制作成一个 40 mm 的像增强器,再进一步制作成 100 mm 的像增强器。为得到更好的探测器特性,需要优化探测器的每一个元件,从 MCP 到读出电子学。基于热中子敏感 MCP 的 40 mm 像增强器采用两片直径为 50 mm,孔径为 10 μm ,厚度为 0.6 mm 的掺 3 mol% Gd_2O_3 MCP 的双中子敏感 MCPV stack 结构,输入窗则直接采用一个石英玻璃窗口,无需制作光阴极。MCP 与荧光屏的间隙大致为 1 mm,以更好地将 MCP 的输出电子云均匀散布到一个足够大的尺寸,通过光学耦合能够覆盖 CCD 芯片上更多的像素,以便 CCD 更好的取样。图 3 为基于热中子 MCP 的事件计数增强器和基于热中子 MCP 增强器的中子相机的结构原理。

对于事件计数 MCP 增强器,荧光层的高空间分辨力将不再重要,同理,由于 MCP 提供了足够的增益,荧光层的高转换效率也不再重要,而荧光屏的衰减时间则成为一个重要参数,以避免帧读出的叠加。但即使是普通的 P20 或 P43 荧光屏,其衰减时间常数都接近 1 kHz,远高于目前所能得到的 CCD 帧率,由此采用 CMOS 有源像素传感器(CMOS-APS)替代 CCD。APS 的高平行结构可以更快速的读出,从而最大限度地保持 MCP 增强器具有大动态范围的高计数率特性。



(a) 中子敏感 MCP 增强管的结构示意图

(a) Schematic diagram of thermal neutron sensitive MCP intensifier



(b) 中子相机原理结构示意图

(b) Schematic diagram of neutron camera

图 3 基于热中子敏感 MCP 增强管的中子相机工作原理示意图

Fig. 3 Schematic diagrams of neutron camera based on thermal neutron sensitive MCP intensifier

数据电子学读出系统包括一个对事件窗口同时取样的序列获得单元、一个对从 CCD 相机获得的图像中确认真实事件的事件确认单元、一个测定事件矩心到亚通道精度的矩心单元以及一个计算事件坐标并将数据传输到主机界面的输出控制单元组成。为满足实时高速的工作需要,数据电子学读出系统对探测到的每一个事件的确认和矩心定位,必须在下一事件发生之前完成。现场可编程门阵列(FPGA)基于电子学系统结合软件再构造的优势,不仅保持固定不变的系统结构,而且允许运行不同算法,可显著提高硬件的逻辑计算速度。

4 结 论

本文在 MCP 玻璃中掺杂 Gd 实现了高探测效率大面阵热中子敏感 MCP。成像结果表明,该 MCP 对 0.25 eV 热中子的探测效率为 30%~50%,分辨力为 60 μm ,探测器的暗计数率低至 0.11 event/($\text{cm}^2 \cdot \text{s}$)。基于中子敏感 MCP 增强器的研制可为中子相机无损检测技术提供一种紧凑式高时空分辨的中子探测器。

中子照相技术的应用长期受限于缺乏高效的中子探测器和位敏读出电子学特别是可用的中子源等技术瓶颈。目前正在建设或已经基本完成建

设的中国工程物理研究院的冷中子源和基于小型加速器中子源可移动式中子源、清华大学微型脉冲中子源(CPHS)以及中国散裂中子源(CSNS)将为以热中子为探针的中子照相提供有效的应用平台。

5 致 谢

感谢长春理工大学吕景文教授提供的掺杂中子敏感核素的 MCP 玻璃,及清华大学工程物理系杨祎罡副教授领导的研究小组提供的基于热中子敏感 MCP 的中子事件计数成像探测器和中子成像实验结果。

参考文献:

- [1] von der HARD P, RITGER H. *Neutron Radiography Handbook* [M]. D. Reidel Publishing Co, 1981.
- [2] SMITH G C. *Neutron Image, Radiography and Tomography* [M]. New York: Brookhaven National Laboratory, 2002:105-107.
- [3] RICHARDS W J, GIBBOONS M R, SHIELDS K C. Neutron tomography developments and applications [J]. *Applied Radiation Isotopes*, 2004, 61 (4):551-559.
- [4] METZKE R W, RUNCK H, STAHL C A, *et al.*. Neutron computed tomography of rat lungs [J]. *Physics in Medicine and Biology*, 2011, 56(1):N1-N10.
- [5] KOUZES R T, ELY J H, ERIKSON L E. Neutron detection alternatives to ^3He for national security applications [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A*, 2010, 623 (3): 1035-1045.
- [6] FRASER G, PEARSON J. The direct detection of thermal-neutrons by imaging microchannel-plate detectors [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 1990, 293(3):569-576.
- [7] FELLER W, DOWNING R, WHITE P. Neutron field imaging with microchannel plates [J]. *SPIE*, 2000, 4141: 291-299.
- [8] TREMSIN A, MCPHATE J, VALLERGA J, *et al.*. High efficiency angular selective detection of thermal and cold neutrons [J]. *SPIE*, 2008, 6945: 68451A.
- [9] TREMSIN A, MCPHATE J, VALLERGA J, *et al.*. Detection efficiency, spatial and timing resolution of thermal and cold neutron counting MCP detectors [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 2009, 604(1-2):140-143.
- [10] FELLER W B, WHITE P, WHITE P B, *et al.*. Microchannel plate special nuclear materials sensor [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, 2011, A652(1): 25-28.
- [11] TREMSIN A S, MCPHATE J B, LEHMANN E H, *et al.*. High resolution neutron radiography with very compact and efficient neutron collimators [J]. *JINST*, 2011, 6(1): C01041.
- [12] TREMSIN A S, MILDNER D F R, FELLER W B, *et al.*. Very compact high performance microchannel plate thermal neutron collimators [J]. *Nuclear Science, IEEE Transaction on*, 2004, 51 (3):1020-1024.
- [13] PAN J, YANG Y, TIAN Y, *et al.*. High detection efficiency neutron sensitive microchannel plate [J]. *Journal of Instrumentation*, 2013, 8(1):P01015.
- [14] TIAN Y, YANG Y G, PAN J SH, *et al.*. High efficiency event-counting thermal neutron imaging using Gd doped microchannel plate [J]. *Chinese Physics C*, 2014, 38 (8): 086003.
- [15] 潘京生,孙建宁,韩晓明.高探测效率低噪声的大面阵热中子敏感微通道板 [J]. *光子学报*, 2014, 43 (12):1204003.
- [16] PAN J SH, SUN J N, HANG X M, *et al.*. High detection efficiency low noise large format neutron sensitive microchannel plate [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, 43(12):1204003. (in Chinese)
- [16] TREMSIN A, FELLER W, DOWNING R. Effi-

- ciency optimization of microchannel plate (MCP) neutron imaging detectors. I. square channels with ^{10}B doping [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 2005, 539(1-2):278-311.
- [17] GROSHEV L. Gamma-ray and conversion electron from the (n, γ) reaction on gadolinium isotopes [J]. *Bulletin Academic Science USSR Physics Ser.*, 1987, 26(3):1127-1141.
- [18] TREMSIN A S, McPHATE J B, VALLERGA J V, *et al.*. Improved efficiency of high resolution thermal and cold neutron imaging, nuclear instrument and methods in physics [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 2001, 628 (1):415-418.
- [19] GREENWOOD R, REICH C, BAADER H, *et al.*. Collective and two-quasi particle states of ^{158}Gd observed through study of radiative neutron capture in ^{157}Gd [J]. *Nuclear Physics in Physics Research A*, 1978, 304(2):327-428.
- [20] 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)
- [21] LAPINGTON J S, MILNES J, PAGE M, *et al.*. Novel electronic readout system for photon counting imagers [J]. *SPIE*, 2000, 4128: 120-128.
- [22] TREMSIN A S, McPHATE J B, VALLERGA J V, *et al.*. High-resolution neutron radiography with microchannel plates: proof-of-principle experiments at PSI [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 2009, 605(1-2): 103-106.
- [23] BERGAMINI P, BONELLI G, TANZI E G, *et al.*. A fast readout and processing electronics for photon counting intensified charge-coupled devices [J]. *Review of Scientific Instrument*, 2000, 7 (4):1841-1849.

作者简介:



潘京生(1965—),男,重庆巫山人,博士,研究员级高工,主要从事基于微通道板的微弱辐射物成像探测器的研究。
E-mail:jspace130@sina.com

(版权所有 未经许可 不得转载)