

doi:10.3788/gzxb20144312.1204003

# 高探测效率低噪声的大面阵热中子敏感微通道板

潘京生<sup>1</sup>, 孙建宁<sup>1,2</sup>, 韩晓明<sup>1</sup>, 张蓉<sup>1</sup>, 孙赛林<sup>1</sup>, 杨祎罡<sup>3</sup>, 田阳<sup>3</sup>,  
金戈<sup>1</sup>, 张正君<sup>1</sup>, 邵爱飞<sup>1</sup>, 苏德坦<sup>1</sup>

(1 北方夜视技术股份有限公司, 南京 211102)

(2 微光夜视技术重点实验室, 西安 710065)

(3 清华大学 工程物理系, 北京 100084)

**摘 要:**在微通道板玻璃中掺中子灵敏核素, 并去除玻璃中的天然放射性同位素成份, 可以实现微通道板对热中子的敏感, 使探测器具有极低的背景事件率. 在微通道板玻璃中掺加 3 mol% 的  $Gd_2O_3$ , 同时去除玻璃中的  $K_2O$  和/或  $Rb_2O$ , 制作成 50 mm 直径、0.6 mm 厚度、10  $\mu m$  孔径的微通道板, 实现了对 25.3 meV 热中子 33% 的探测效率, 同时探测器的暗计数率低至  $0.11 \text{ events cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ . 通过计算和分析热中子在微通道板基体中的俘获概率和  $^{155,157}Gd(n, \gamma)^{156,158}Gd$  反应所能引发的有效信号, 说明了通过微通道板的结构优化, 掺 3 mol%  $Gd_2O_3$  的微通道板可以实现最大 50% 的热中子探测效率. 在此基础上, 进一步完成了 106 mm 直径 10  $\mu m$  孔径的掺 3 mol%  $Gd_2O_3$  的优化结构大面阵低噪声中子敏感微通道板的制作.

**关键词:**中子照相; MCP 事件计数探测器; 大面阵中子敏感 MCP; 探测效率; 暗计数率

**中图分类号:** TL816<sup>+</sup>.3; TN151<sup>+</sup>.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-4213(2014)12-1204003-5

## High Detection Efficiency Low Noise Large Format Neutron Sensitive Microchannel Plate

PAN Jing-sheng<sup>1</sup>, SUN Jian-ning<sup>1,2</sup>, HAN Xiao-ming<sup>1</sup>, ZHANG Rong<sup>1</sup>, SUN Sai-ling<sup>1</sup>,  
YANG Yi-gang<sup>3</sup>, TIAN Yang<sup>3</sup>, JIN Ge<sup>1</sup>, ZHANG Zheng-jun<sup>1</sup>, SHAO Ai-fei<sup>1</sup>, SU De-tan<sup>1</sup>

(1 North Night Vision Tech. Corp., Ltd., Nanjing 211102, China)

(2 Science and Technology on Low-Light-Level Night Vision Laboratory, Xi'an 710065, China)

(3 Department of Engineering Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** Both direct addition of neutron-absorbing atoms into Microchannel Plate (MCP) glass and elimination of content contained natural radioactive isotope can make MCP sensitive to neutrons without changing the remainder of the fabrication process, while such a neutron-sensitive detector has very low background rate. The 50 mm format and 10  $\mu m$  pore size MCP which fabricated by a MCP glass doped with 3 mol%  $Gd_2O_3$  and eliminate  $K_2O$  and  $Rb_2O$  content demonstrated its capability to image thermal neutrons with 33% detection efficiency and low dark count rate of  $0.11 \text{ events cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ . Through calculation and analysis of the capture probability of neutron within a MCP matrix and the effective signal which arised from  $^{155,157}Gd(n, \gamma)^{156,158}Gd$  reaction production, our study indicated that the maximum detection efficiency of 50% can be achieved for this MCP doped with 3 mol%  $Gd_2O_3$  and optimized geometry. In addition, a 106 mm-diameter and 10  $\mu m$  pore size neutron sensitive MCP doped with 3 mol%  $Gd_2O_3$  and optimized geometry were fabricated based on above-mentioned method.

**Key words:** Neutron radiography; MCP event counting detector; Large format neutron sensitive MCP; Detection efficiency; Dark count rate

**OCIS Codes:** 040.1880; 110.2970; 120.5630; 160.1890

基金项目: 国家自然科学基金(Nos. 11075026, 61275152)资助

第一作者: 潘京生(1965-), 男, 研高工, 博士, 主要研究方向为基于微通道板的成像探测器. Email: jspan130@sina.com

收稿日期: 2014-03-07; 录用日期: 2014-05-06

<http://www.photon.ac.cn>

## 0 引言

热中子照相已成为对复杂物品和结构进行无损检测的重要工具. 热中子可以穿透高、中  $Z$  材料(如铅、铁)来检查内部被遮盖住的物体, 并且仅对核素而非元素敏感, 热中子对轻物质有较好的分析灵敏度, 尤其是 $^1\text{H}$ , 特别有利于在金属背景下测量渗水、渗油以及导火索的缺陷等情况. 热中子照相可应用于火工品检测、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, 在检测含氢材料、重金属组件、原子序数相近的材料和某些复合材料、放射性材料等方面, 可弥补 X 射线照相等其它无损检测技术的不足<sup>[1]</sup>.

微通道板(Microchannel Plate, MCP)是一种具有二维空间分辨能力的通道式电子倍增器, 同时兼具对电子、离子、UV 光子和软 X 射线的探测能力, 以及亚纳秒级的时间分辨能力. 基于 MCP 堆以及位敏阳极的直接电荷输出, 可实现对极微弱的离散辐射物的事件计数成像<sup>[2-3]</sup>. 通过在 MCP 玻璃成份中引入中子灵敏核素, 可使 MCP 获得对中子的敏感, 由此可将 MCP 事件计数探测器在空间和时间分辨力上的优点成功地拓展到以热中子为探针的成像探测应用<sup>[4]</sup>.

降低 MCP 的背景事件率(也称为暗计数率), 如同增加探测效率, 可提高探测器的灵敏度. 普通 MCP V 型堆的暗计数率在  $1\sim 3\text{ events cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ , 通过老化和真空保持, 所能达到的极限值约为  $0.4\text{ events cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ , 这与其来自于玻璃成份中约  $7\text{ mol}\% \text{K}_2\text{O}$  中的放射性天然同位素 $^{40}\text{K}$  的  $\beta$  衰变的残余辐射的说法相吻合, 如果这部份辐射物从 MCP 玻璃中被去除, 理论上的背景事件率则决定于宇宙射线流, 目前低噪声 MCP 堆的暗计数率已降低到了  $0.063\text{ events cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ <sup>[5-6]</sup>.

Feller 等于 2000 年最早实现掺 $^{10}\text{B}$  和/或  $\text{Gd}$  的中子敏感 MCP<sup>[7]</sup>, 在此基础上持续改进, 目前基于 Nova 的 HB-4 MCP 热中子计数成像探测器达到了 50% 的热中子探测效率, 优于  $20\ \mu\text{m}$  半高宽度(Full Width at Half Maximum, FWHM)的空间分辨力, 约  $1\ \mu\text{s}$  的时间分辨力和  $0.1\text{ events cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  的暗计数率<sup>[8-9]</sup>. Nova 的中子敏感 MCP 孔径最小达到了  $8\ \mu\text{m}$ , 但外径通常最大不超过  $50\ \text{mm}$ <sup>[9]</sup>.

相同的合作目前也已经在国内得到开展, 由清华大学和北方夜视技术股份有限公司合作研制的基于  $50\ \text{mm}$  直径  $10\ \mu\text{m}$  孔径的掺  $3\text{ mol}\% \text{Gd}_2\text{O}_3$  无  $\text{K}_2\text{O}$  和  $\text{Rb}_2\text{O}$  的 MCP 中子事件计数成像探测器, 达到了 33% 的热中子探测效率和  $0.11\text{ events cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  的暗计数率, 但掺  $3\text{ mol}\% \text{Gd}_2\text{O}_3$  MCP 理论上可以实现最大 50% 的热中子探测效率<sup>[10-11]</sup>.

本文介绍了掺  $3\text{ mol}\% \text{Gd}_2\text{O}_3$  无  $\text{K}_2\text{O}$  和  $\text{Rb}_2\text{O}$  的

MCP 的研制情况, 以及其在热中子探测器上的实验结果, 同时说明了通过 MCP 结构的优化, 掺  $3\text{ mol}\% \text{Gd}_2\text{O}_3$  MCP 可以实现 50% 的热中子探测效率, 最后介绍了结构优化的高探测效率低噪声的大阵列中子敏感 MCP 的制作情况.

## 1 低噪声中子敏感 MCP

### 1.1 无 $\text{K}_2\text{O}$ 和 $\text{Rb}_2\text{O}$ 组份的掺 $3\text{mol}\% \text{Gd}_2\text{O}_3$ 的 MCP

在 MCP 玻璃中掺杂  $3\text{mol}\% \text{Gd}_2\text{O}_3$ , 同时去除玻璃中含有放射性天然同位素的组份  $\text{K}_2\text{O}$  (含 $^{40}\text{K}$ ) 和 (或)  $\text{Rb}_2\text{O}$  (含 $^{87}\text{Rb}$ ), 然后与在温度粘度特性和酸溶速率相匹配的酸溶芯玻璃组合, 依然沿用 MCP 的制作方法, 使 MCP 获得热中子探测能力和低背景噪声特性.

MCP 对基体玻璃的最基本要求是合适的二次发射特性和一个极微弱的表面导电性, 这两个特性来自于对 MCP 基体进行的烧氢处理过程, 玻璃成份中含有的  $\text{PbO}$ 、 $\text{Bi}_2\text{O}_3$  等在热氢气氛中的表面还原是导电机理的基础, 而碱金属成份在湿热条件下向通道最外层的表面偏析则最终贡献于高额的二次电子产额. 但 MCP 的制作过程对通道内壁表面的成份和微观结构有着极为紧密的关联, 从而决定 MCP 的最终性能. 因此这种掺  $3\text{mol}\% \text{Gd}_2\text{O}_3$  并且无  $\text{K}_2\text{O}$  和  $\text{Rb}_2\text{O}$  的 MCP 皮玻璃成份, 应在结合 MCP 制作工艺的基础上, 对电导性、二次发射特性、化学稳定性和芯玻璃的温度粘度匹配以及最终可接受的性能等要求进行综合平衡和互补.

基于还原铅硅酸盐玻璃 MCP 的制作采用一个铅硅酸盐玻璃管和一个酸溶芯玻璃棒, 通过熔合纤维光学制作和腐蚀除芯处理, 包括一个单丝拉制和一个复丝拉制过程, 然后将截成一定长度的复丝排列在金属模具中经热压熔合成屏段, 冷却后的屏段以一个倾斜角斜切后, 滚圆抛光为满足要求直径和厚度的 MCP 毛坯, 经过酸蚀溶除芯的特殊过程, 形成 MCP 阵列, 然后经过氢还原处理, 最后在两面蒸镀上电极.

MCP 单丝拉制时的芯玻璃粘度值约在  $10^{7.6}\text{ dPas}$ , 复丝拉制时的芯玻璃粘度值约在  $10^{8.5}\text{ dPas}$ , 这两个过程要求芯玻璃的粘度高于皮玻璃的粘度. 熔合过程主要依靠皮玻璃的粘滞移动来填充纤维阵列间的空隙, 此时皮玻璃粘度约为  $10^{9.5}\text{ dPas}$ , 在一定压力下具有粘滞移动特性, 芯玻璃的粘度值大于  $10^{11.5}\text{ dPas}$ , 以保持刚性确保纤维阵列结构规则不产生错位.

$\text{Gd}_2\text{O}_3$  在玻璃结构中属于网络外体, 以其替换 MCP 玻璃中低原子序数的网络外体, 同时去除玻璃中  $\text{K}_2\text{O}$  或/和  $\text{Rb}_2\text{O}$  等成份, 玻璃的软化温度将显著提高, 为此需要一种高软化温度的酸溶芯玻璃与其在温度粘度上相匹配. 图 1 所示的是掺  $3\text{mol}\% \text{Gd}_2\text{O}_3$  无  $\text{K}_2\text{O}$  和  $\text{Rb}_2\text{O}$  的皮玻璃 NGG, 与其相匹配芯玻璃 X-7, 制作普通 MCP 的皮玻璃 P1 和芯玻璃 X-5 的温度粘度曲线.

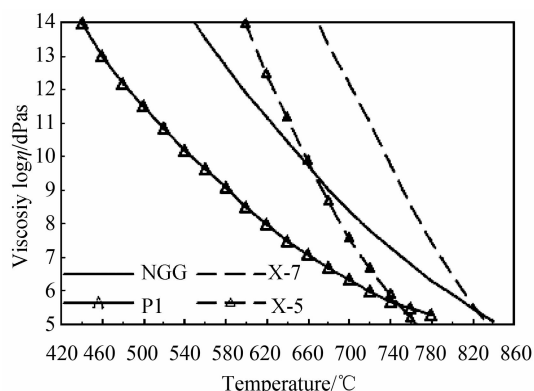


图1 不同玻璃材料的温度粘度曲线  
Fig.1 Temperature viscosity curve of different glasses

芯皮玻璃的组份和网络结构的本质不同导致其在酸溶速率上有显著差别,由此实现的 MCP 酸溶除芯要求芯皮玻璃酸的溶速率比大于 1 000 倍,而制作 120 : 1 长径比 MCP 则要求大于 2 000 倍.与掺 3 mol% Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 无 K<sub>2</sub>O 和 Rb<sub>2</sub>O 的 MCP 皮玻璃匹配的酸溶芯玻璃,为提高软化温度,增加了 SiO<sub>2</sub> 含量,耐酸性也相应得到改善,使腐蚀除芯工

艺变得非常复杂,需要较长的时间和多次的酸碱交替.

本文制作的 50 mm 直径 10 μm 孔径掺 3 mol% Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 无 K<sub>2</sub>O 和 Rb<sub>2</sub>O 含量的 MCP,可经受长时间的腐蚀除芯处理,制作出长径比最大可达到 120 : 1 以上的 MCP,开口面积比约 63%,通过 520 °C 的氢还原后,体电阻在 10<sup>7</sup> ~ 10<sup>8</sup> Ω 范围,增益与普通 MCP 相当.

### 1.2 热中子成像探测的实验结果

清华大学研制的热中子事件计数成像探测器的原理结构如图 2,由 1 片中子敏感 MCP,1 片普通 MCP 的 V 型堆以及 1 个楔条形阳极(Wedge Stripe Anode, WSA)组成,探测器安装在一个具有真空系统的不锈钢腔体中.一个中子事件由中子敏感 MCP 探测并被转换成一个电子雪崩,经后一级的普通 MCP 再次放大,对整个事件提供 10<sup>6</sup> ~ 10<sup>7</sup> e<sup>-</sup>/n 增益,降落到 WSA 上的电子云由电子学读出系统收集,计算 W、S 和 Z 电极上的电荷比,可获得电子云所在的时间和空间密度分布,实现以热中子为探针的成像探测.

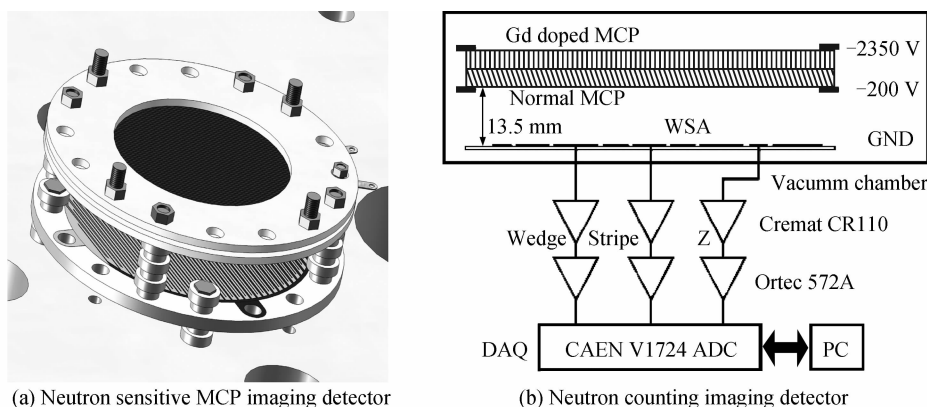


图 2 基于中子敏感 MCP 的中子计数成像探测器的原理结构示意图

Fig.2 Schematic diagram of neutron sensitive MCP based neutron counting imaging detector

1 片直径为 50 mm、孔径为 10 μm、开口面积比为 63% 的 0.6 mm 厚度无斜切角的掺 3mole% Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 无 K<sub>2</sub>O 和 Rb<sub>2</sub>O 含量的 MCP,与 1 片相同尺寸 8°斜切角的普通 MCP 组成的 MCP V 型堆,装配在探测器中,对近垂直入射的 25.3meV 热中子束,探测器实现了以中

子为探针的事件计数成像,如图 3,探测效率达到 33%.同时,即使是 MCP 堆的后级采用的是普通 MCP,探测器的暗计数率仍然达到 0.11 events cm<sup>-2</sup> · s<sup>-1</sup>,但受限于系统的阳极和电子学读出,探测器分辨力为 150 μm<sup>[1]</sup>.

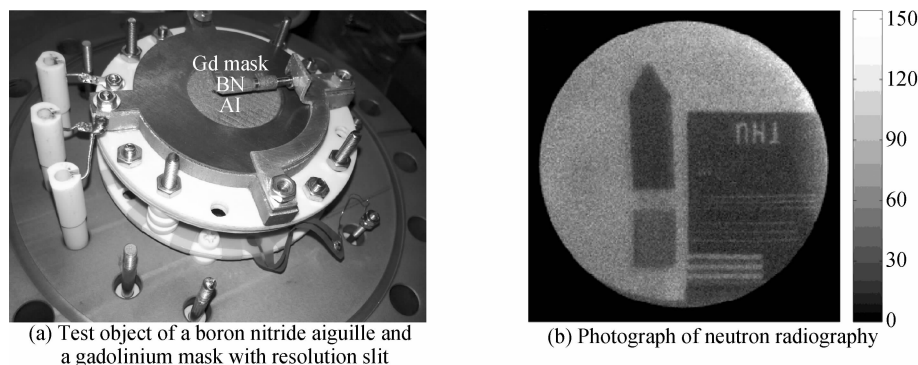


图 3 基于中子敏感 MCP 的探测器对一个有分辨力狭缝的 Gd 模板和一个 BN 钻头的热中子成像  
Fig.3 Photograph of neutron radiography for a boron nitride aiguille and a gadolinium mask with resolution slit

## 2 高探测效率低噪声的大阵列中子敏感 MCP

### 2.1 掺 3 mol% Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的 MCP 热中子探测效率预估

中子敏感 MCP 的探测效率,由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和该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,即  $Q_n = P_1 \cdot P_2 \cdot P_3$ . 如果 MCP 探测器工作于合适的“转换/放大”模式,对读出电子学提供足够的增益和动态范围,一个电子雪崩总是可以产生一个可探测的电子脉冲,即  $P_3 = 1$ .

中子的吸收效率取决于 MCP 中所掺中子灵敏核素的中子俘获反应截面和其在 MCP 基体中的数量密度与 MCP 的有效面积比,在 MCP 玻璃壁中所吸收中子的概率为<sup>[12]</sup>

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

式中  $N_i$  是 MCP 基体单位体积中的中子吸收核素原子  $i$  的数量,  $\sigma_i$  是该原子的中子俘获反应截面,  $L_{\text{eff}}$  是中子轨迹在 MCP 结构中的有效路径. 穿越通道开口的部份对吸收没有贡献,如图 4.

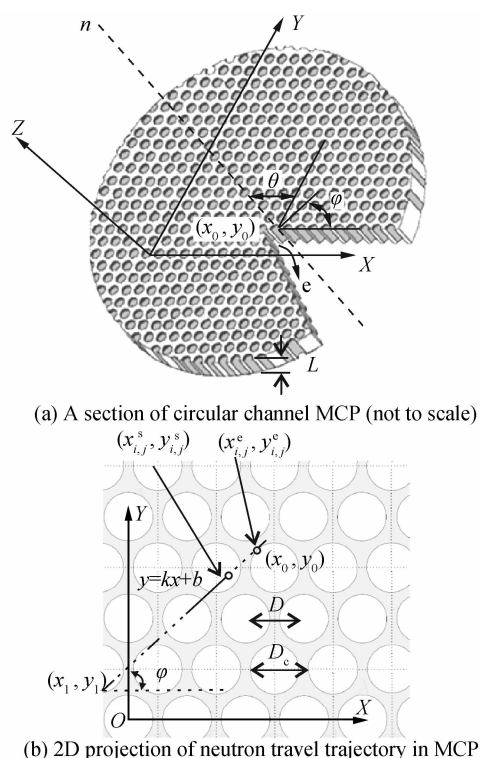


图 4 用来计算中子在 MCP 基体中传播轨迹的坐标系  
Fig. 4 Coordinates system used for calculation of the travel trajectory in MCP matrix

中子俘获反应截面  $\sigma$  与中子能量紧密相关,<sup>155</sup>Gd 和<sup>157</sup>Gd 对 25.3 meV 热中子的俘获截面分别为 61 000 b 和 259 000 b,<sup>155</sup>Gd 和<sup>157</sup>Gd 的天然丰度分别为 14.8% 和 15.7%, 一个 25.3 meV 的热中子在一个掺

3 mol% Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的 MCP 基体中的有效路径为 0.6 mm 时被吸收的概率可接近 100%.

中子被 MCP 基体中的<sup>155,157</sup>Gd 俘获后产生<sup>155,157</sup>Gd( $n, \gamma$ )<sup>156,158</sup>Gd 反应, ( $n, \gamma$ ) 反应具有很高的内转换概率,每次中子吸收平均会伴随 0.875 个电子出射<sup>[13]</sup>,如考虑内转换电子和俄歇电子的级联关系,每次中子吸收有 0.65 个电子产生.

对于一个厚度为 0.6 mm 无斜切角且开口面积比为 63% 的 MCP 和一个垂直入射的热中子束(即入射到通道中的中子将穿过通道而不撞击通道壁), 3 mol% Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的掺杂量可达到 34% 的热中子探测效率,这与实验值相符.

( $n, \gamma$ ) 反应产物的内转换电子(及随后可能的俄歇电子)能量在 29~181 keV 之间<sup>[14]</sup>,在 MCP 玻璃中的最大射程为 14~15  $\mu\text{m}$ <sup>[15]</sup>,这意味着对于一个 10  $\mu\text{m}$  孔径 MCP,中子事件可限定在 2 到 3 个相邻通道中,并且通道阵列结构对( $n, \gamma$ ) 反应产物的逸出概率影响甚微,降低 MCP 开口面积比也是获得中子吸收概率的有效途径.

因此,撇开中子吸收、相互反应、二次粒子逸出及雪崩形成,通过优化 MCP 的斜切角、开口面积比和厚度,增加中子在 MCP 基体中的有效路径以提高对中子的吸收效率,可进一步提高掺 3 mol% Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> MCP 的热中子探测效率. 当一个开口面积比为 50%~55%, 长径比为 60:1~120:1,斜切角为 1°~2° 甚至更大时,掺 3 mol% Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> MCP 的热中子探测效率可达到 50%.

### 2.2 大阵列低噪声中子敏感 MCP 的制作

目前中国先进研究堆(China Advanced Research Reaction, CARR)和国家核技术工业应用工程技术研究中心的研究堆以及清华大学的微型脉冲强子源(Compact Pulse Hardon Source, CPHS)已经基本完成建设,中国散裂中子源(China Spallation Neutron Source, CSNS)也已开工建设,将来可为以中子为探针的无损检测提供更多的应用平台. 相对实现以热中子为探针的无损检测技术的应用,实现大阵列中子敏感 MCP 高探测效率和低背景事件率同等重要.

北方夜视技术股份有限公司的 MCP 产品系列,目前在外形尺寸上已经覆盖 18~106 mm 的外径和 21~5  $\mu\text{m}$  的孔径,以及相应最大对角线尺寸的多种方形、矩形 MCP 和客户定制的异形 MCP. 其中 50~56 mm 外径 MCP 孔径最小可达 6  $\mu\text{m}$ ,厚度最薄可达 0.25 mm. MCP 可满足  $10^8 \text{ events cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  的高计数率要求的低阻抗大动态范围,106 mm 的最大阵列 MCP 的孔径最小可到 12  $\mu\text{m}$ .

大阵列 MCP 的关键制作工序是复丝阵列的排列和熔合(称为排屏和压屏). 国内 MCP 制作技术采用人

工将切成一定长度的复丝经过精选后逐一规则整齐地排列到热压模具中,对于有实体边的 MCP,则需在有效区外排列可不被腐蚀的实体边玻璃拉制成的六边形纤维.将排列好复丝阵列的热压模具放入真空炉中,采用真空机械热压熔合的方法,在一定的温度压力下,使规则排列的复丝熔合形成熔合纤维结构阵列(屏段).

国外 MCP 制作采用玻壳气压熔合法,即将复丝排入玻壳中,然后将排入复丝的玻壳置入一密闭腔体中,抽出封闭玻壳中的气体,并加热到一定温度,然后增大密闭腔体气压,使纤维阵列熔合成为熔合纤维结构阵列(Boule),玻壳壳则自然形成 MCP 的实体边.

机械热压熔合可在一个较低的温度(皮玻璃的粘度约为  $10^{9.5}$  dPas)下进行,而真空熔合需在一个较高的温度(皮玻璃粘度值  $10^{8.5}$  dPas)下进行.

大面阵 MCP 需要更多复丝阵列的排列和熔合,不仅增加了工作量,也增加了阵列熔合的难度,同时要考虑 MCP 的机械强度. MCP 的实体边部份与通道阵列部份在温度粘度和热膨胀系数上的匹配,是决定 MCP 机械强度的一个关键因素,因此通常大面阵和中等面阵的 MCP 没有实体边.显然对于大面积阵列无实体边 MCP 的制作,机械热压模的方法更为方便和适宜.

直径为 106 mm、孔径为  $10\ \mu\text{m}$  的大面阵中子敏感 MCP,仍然采用掺 3mol%  $\text{Gd}_2\text{O}_3$  无  $\text{K}_2\text{O}$  和  $\text{Rb}_2\text{O}$  含量的 NGG 皮玻璃与高软化温度的酸溶芯玻璃 X-7 来制作,由于目前正在研发的位敏阳极和读出电子学在短期内还达不到高分辨力要求,在不牺牲探测器空间分辨力的基础上,大面阵中子敏感 MCP 采用一个  $8^\circ$  的斜切角,同时把开口面积比降低到 60% 甚至 50% 以下,以增加中子在 MCP 基体中的有效路径,进一步提高中子吸收效率.

在利用现有最大 106 mm 的普通大面阵 MCP 制作技术的基础上,完成了直径为 106 mm、孔径为  $10\ \mu\text{m}$ 、开口面积比为 56%、厚度为 0.6 mm、斜切角为  $8^\circ$  的掺 3mol%  $\text{Gd}_2\text{O}_3$  无  $\text{K}_2\text{O}$  和  $\text{Rb}_2\text{O}$  含量的 MCP 的制作,一个耗时长且多次酸碱交替的酸蚀除芯处理,和一个  $520^\circ\text{C}$  的氢还原.通过调整氢还原时间,体电阻在  $10^7\sim 10^8\ \Omega$  范围可调,增益与普通 MCP 相当.

### 3 结论

基于中子敏感 MCP 的中子事件计数成像探测器是实现中子照相无损检测的有效手段,而在 MCP 皮玻璃中掺  $\text{Gd}_2\text{O}_3$  同时去除  $\text{K}_2\text{O}$  和/或  $\text{Rb}_2\text{O}$  组份是实现高探测效率低噪声大面阵中子敏感 MCP 的最佳方法.目前清华大学正在进行更先进的读出电子学的研发,力使大面阵中子事件计数成像探测器在空间分辨力和计数率上得到提升,并将把基于中子敏感 MCP 的中子

事件计数成像探测器装置在新建成的 CPHS 装置上.

#### 参考文献

- [1] GRAHAM C. Neutron image, radiography and tomography. Brookhaven national laboratory [M]. Upton, NY, 2002: 105-107.
- [2] 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.
- [3] LIU Yon-gan, ZHAO Bao-sheng, ZHU Xiang-pin, *et al.* Analysis and testing of wedge-and-strip anode detector characteristics [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(4): 750-755.  
刘永安,赵宝升,朱香平,等.楔条形阳极探测器的性能测试与分析 [J]. *光子学报*, 2009, **38**(4): 750-755.
- [4] 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**: 569-576.
- [5] SIEGMUND O, VALLERGA J, WARGELIN B. Background events in microchannel plates [J]. *IEEE Translation on Nuclear Science*, 1988, **35**(1): 524-528.
- [6] NI Qi-liang, BU Shao-fang, LIU Shi-jie, *et al.* Preconditioning experiment research of microchannel plate photon counting imagine detector [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **41**(6): 658-663.  
尼启良,卜绍芳,刘世界,等.微通道板光子计数成像探测器预处理实验研究 [J]. *光子学报*, 2009, **41**(6): 658-663.
- [7] FELLER W, DOWNING R, WHITE P. Neutron field imaging with microchannel plates [C]. SPIE, 2000, **4141**: 291-299.
- [8] TREMSIN A, MCPHATE J, VALLERGA J, *et al.* High efficiency angular selective detection of thermal and cold neutrons [C]. 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] PAN J, YANG Y, TIAN Y, *et al.* High detection efficiency neutron sensitive microchannel plate [J]. *Journal of Instrumentation*, 2013, **8**(1): P01015.
- [11] TIAN Yang, YANG Yi-gang, PAN Jing-sheng, *et al.* High efficiency event-counting thermal neutron imaging using Gd doped microchannel plate [J]. *Journal of Instrumentation*, 2013, **8**: P01015.
- [12] TREMSIN A, FELLER W, DOWNING R. Efficiency optimization of microchannel plate (MCP) neutron imaging detectors. I. Square channels with  $^{10}\text{B}$  doping [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 2005, **539**(1-2): 278-311.
- [13] GREENWOOD R, REICH C, BAADER H, *et al.* Collective and two-quasiparticle states of  $^{158}\text{Gd}$  observed through study of radiative neutron capture in  $^{157}\text{Gd}$  [J]. *Nuclear Instrument and Methods in Physics Research A*, 1978, **01**: 304:327.
- [14] GROSHEV L. Gamma-ray and conversion electron from the  $(n, \gamma)$  reaction on gadolinium isotopes [J]. *Bulletin Academic Science USSR Physics Ser*, **26**(3): 1127-1146
- [15] TREMSIN A S, MCPHATE J B, VALLERGA J V, *et al.* Improved efficiency of high resolution thermal and cold neutron imaging [J]. *Nuclear Instrument and Methods in Physics Research A*, 2001, **628**(1): 415-418.