

新型热中子敏感微通道板探测效率的蒙特-卡罗模拟研究

王胜 李航 曹超 吴洋 霍合勇 唐彬

Optimal calculation of detection efficiency for thermal neutron sensitive microchannel plate

Wang Sheng Li Hang Cao Chao Wu Yang Huo He-Yong Tang Bin

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 64, 102801 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.102801

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.102801>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I10>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

多峰场负氢离子源磁体布局对等离子体特性影响的数值模拟研究

Numerical simulation research of plasma characteristics in a multi-cusp proton source based on magnets layout

物理学报.2015, 64(8): 085203 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.085203>

反应堆蒙特卡罗临界模拟中均匀裂变源算法的改进

Modified uniform-fission-site algorithm in Monte Carlo simulation of reactor criticality problem

物理学报.2015, 64(5): 052801 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.052801>

极化中子照相磁场量化技术方案比较与分析

Comparison of two approaches to magnetic field quantification by polarized neutron images

物理学报.2014, 63(18): 182801 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.182801>

装置极化效率对极化中子成像质量的影响及修正分析

Effect of apparatus polarization efficiency on quantification analysis in polarized neutron imaging

物理学报.2013, 62(16): 162801 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.162801>

基于小型加速器的编码中子源成像研究

Study of coded source neutron imaging based on a compact accelerator

物理学报 2013, 62(12): 122801 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.122801>

新型热中子敏感微通道板探测效率的蒙特-卡罗模拟研究^{*}

王胜[†] 李航 曹超 吴洋 霍合勇 唐彬

(中国工程物理研究院核物理与化学研究所, 绵阳 621900)

(2014年9月25日收到; 2014年11月3日收到修改稿)

基于 microchannel plates (MCP) 的中子探测技术近年来发展迅速, 因其具有较高的空间分辨率和中子探测效率以及优异的时间分辨能力, 可用于高分辨率中子照相和能量选择中子成像. 本文利用蒙特-卡罗 (MC) 程序, 对栅格为 15 μm 的热中子敏感 MCP 板进行 MC 模拟计算, 获得了不同几何结构和材料组成情况下, 掺杂型和镀膜型热中子敏感 MCP 板的探测效率. 计算结果表明, 增加中子敏感材料的比例可以获得更高的中子阻挡效率, 但同时也加大了次级粒子发射进入 MCP 板通道的难度, 掺杂型 MCP 板的通道直径和镀膜型 MCP 板的镀膜厚度均存在最优值. MCP 板厚度为 0.4 mm 时, 对 $^{10}\text{B}_2\text{O}_3$ 材料, 掺杂型 MCP 板的热中子探测效率可以超过 40%, 镀膜型 MCP 板的热中子探测效率可以接近 60%.

关键词: 热中子探测, 微通道板, 蒙特-卡罗模拟, 优化计算

PACS: 28.20.Pr, 28.41.AK, 52.65.Pp

DOI: 10.7498/aps.64.102801

1 引言

现阶段热中子照相领域采用的探测系统主要包括热中子闪烁屏搭配胶片或者 CCD 相机, 热中子 IP 板等. 由于实时成像和层析成像的兴起, 热中子闪烁屏搭配 CCD 相机在中子照相领域应用最为广泛, 其空间分辨率可以达到几十微米. 但该方法有其自身的局限性, 要获取固有分辨率较高的热中子闪烁屏, 其厚度一般较小, 另外 CCD 相机在采集闪烁屏发光过程中存在光损失, 这都影响其对热中子的探测效率. 基于 microchannel plates (MCP) 的热中子探测技术, 是未来可用于中子照相领域的新型中子探测技术. 该技术具有高空间分辨的特点, 可用于微结构探测; 利用其高时间分辨特点, 还可以实现快速成像、信号触发成像等; 配合飞行时间法, 该技术可用于某些对中子能量选择性较强的新型成像方式, 如中子共振吸收成像^[1]、极化中子

成像^[2]、编码中子源成像等^[3].

基于中子敏感 MCP 板的中子探测器, 其探测过程包含几个步骤: 不同能量的中子轰击到中子敏感 MCP 板上, 产生核反应生成次级粒子; 这些次级粒子从中子敏感材料中逃逸到 MCP 板通道内, 并在通道壁上产生次级电子; MCP 板两端加电压形成电场, 使次级电子产生雪崩; 雪崩电子被电子学系统获取并进行信号记录. 对热中子而言, B, Li 和 Gd 等都是良好的中子敏感材料, 中子轰击 B 后发射的次级粒子种类多, 能量单一, 更利于提高探测效率, 而中子轰击 Li, Gd 后发射的次级粒子含长射程粒子, 对于位置分辨相对不利.

基于 MCP 的中子探测技术近年来发展迅速. 美国加州大学伯克利分校的 Tremsin 团队^[4,5]对中子敏感 MCP 板的中子探测效率进行了计算, 进行了读出设备的设计, 并最终完成了基于 MCP 的中子探测器集成^[6,7], 利用该中子探测器, Tremsin 团队进行了不同能量下的中子成像实验^[8-11]. 现阶

^{*} 中国工程物理研究院科学基金 (批准号: 2014B0103007)、中国工程物理研究院中子物理学重点实验室基金 (批准号: 2013CB01, 2012BB03) 和国家自然科学基金 (批准号: 11205138, 11375156) 资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: mrtn5851@gmail.com

段 Tremsin 团队设计的 MCP 中子探测器空间分辨率达到 $15\ \mu\text{m}$, 冷中子探测效率超过 70%, 超热中子探测效率为 20% 左右, 且具有较快的探测速度. 国内方面, 清华大学的杨祎罡团队近年来也开展了基于 MCP 的热中子探测技术相关研究, 包括中子敏感 MCP 板的探测效率、读出结构设计和中子实验等方面^[12-14]. 近期的中子实验结果表明, 其初步封装的中子 MCP 探测器空间分辨率可达到 $200\ \mu\text{m}$ ^[15].

本文拟利用蒙特-卡罗 (MC) 程序, 对基于 MCP 板的热中子探测器的探测效率进行模拟计算. 模拟计算主要针对掺杂型和镀膜型 MCP 板, 根据现有市面上普通 MCP 板的几何参数, 计算在栅格尺寸为 $15\ \mu\text{m}$ 情况下, MCP 板厚度为 $0.4\ \text{mm}$ 时不同的 MCP 结构、不同的中子敏感元素、不同的通道直径和镀膜厚度下的热中子探测效率, 以得到特定条件下较为优异的结构参数和材料成分. 计算结果表明: 中子敏感 MCP 板的两种探测效率随着几何参数的改变其变化趋势刚好相反, 掺杂型和镀膜型 MCP 板均存在较为优异的结构, 使热中子探测效率最高.

2 探测效率

常规 MCP 板的通道排布主要有方形和蜂巢形两种, 通道的形状包括长方形、六边形和圆柱形等. 另外为了使电子更利于雪崩, 通道中心轴线往往和 MCP 表面法线呈一定角度 ($6^\circ-10^\circ$). 通过添加中子敏感元素, 如 B, Li 和 Gd 等, 可以使常规 MCP 成为中子敏感 MCP, 以俘获中子. 加工工艺主要有掺杂和镀膜两种, 掺杂型中子敏感 MCP 在基底制造过程中添加中子敏感物质, 再进行蚀刻以得到微通道结构, 其几何结构和常规 MCP 没有区别; 镀膜型中子敏感 MCP 在常规 MCP 的通道内壁镀上一层中子敏感物质, 其有效的中子转换发生在镀膜层中. 图 1 为 ^{10}B 掺杂型中子敏感 MCP 探测热中子的示意图, 图中标注了本文计算中基本的几何参数.

根据 MCP 热中子探测的探测过程, 可以将中子敏感 MCP 的热中子探测效率分解为三个部分^[3]: 热中子被 MCP 板中中子敏感材料吸收的概率 P_1 ; 中子被吸收发生核反应产生的次级粒子逃逸到 MCP 通道中并轰击产生雪崩电子的概率 P_2 ; 次级粒子在通道壁上产生的电子被探测

系统获取的概率 P_3 . 因此总的热中子探测效率 $P = P_1 \times P_2 \times P_3$.

对掺杂型 MCP 板, 不管是方形结构还是蜂巢结构, 在 MCP 的通道壁厚一定情况下, 如果通道的开孔越大, 那么含有中子敏感材料相对于整个 MCP 的比例降低, 因此 P_1 就会越小. 同时, MCP 通道的壁厚越厚, 那么次级粒子就更难逃逸到通道中, 对应 P_2 就越小. 对镀膜型中子敏感 MCP 板, 在 MCP 板的几何结构确定的情况下, 随着镀膜厚度的增加, 中子敏感材料在 MCP 板所占的有效比例增加, P_1 就会增大. 而同时, 由于镀膜厚度的增加, 在镀膜层中发生核反应得到的次级粒子相对就更难以逃逸到通道中, P_2 就会减小. 本文中将次级粒子轰击通道壁产生的电子被探测系统收集的概率 P_3 视为 1.

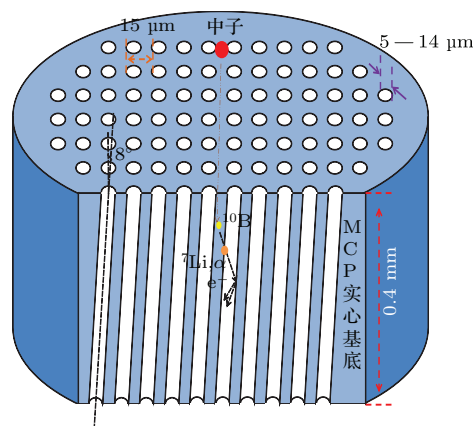


图 1 中子敏感 MCP 探测热中子原理示意图

Fig. 1. The principle sketch map of thermal neutron sensitivity MCP.

Tremsin 等^[4,5]通过解析方法对中子敏感 MCP 的探测效率进行了计算, 陆年华和杨祎罡^[12]针对掺杂型和镀膜型 MCP 板的热中子探测效率进行了初步的 MC 计算, 其 P_1 和 P_2 的计算结果和理论分析的预期变化趋势一致. 本文利用 MC 模拟计算方法, 旨在获取不同中子敏感材料情况下最佳的通道直径 (镀膜厚度) 及其对应的热中子探测效率, 此工作可以为得到较高探测效率的热中子 MCP 探测器的研制提供帮助.

3 计算方法

针对 P_1 , 通过计算入射到 MCP 板前表面的热中子注量率 I_0 和 MCP 板后表面出射的热中子注量率 I_1 , 得到在 MCP 板中中子被吸收的概率, 其计算公式为

$$P_1 = 1 - \frac{I_1}{I_0}. \quad (1)$$

针对 P_2 , 通过计算热中子敏感元素和热中子发生核反应后总的次级粒子径迹数 (N_t) 和未穿透通道 (N_n) 两种情况, 进而得到次级粒子能够进入通道内的概率, 这里认为次级粒子只要进入通道后必然能在通道比轰击产生雪崩电子. 有计算公式:

$$P_2 = 1 - \frac{N_n}{N_t}. \quad (2)$$

值得注意的是, 针对不同的热中子敏感元素, 由于次级粒子的不同, P_2 的计算存在差异. 对 ^{10}B 而言, 次级粒子包括 ^4He , ^7Li 和 γ 三种, 对于中子数量探测而言, 任何一种次级粒子进入通道都是有效的, 对于位置分辨而言, 不考虑长射程的 γ 射线对于 P_2 的贡献. ($n, ^{10}\text{B}$) 反应中 γ 的出射概率为 0.94^[5,12], 可以得到

$$P_{2\text{数量}}^{^{10}\text{B}} = 1 - (1 - P_2^{^4\text{He}}) \times (1 - P_2^{^7\text{Li}}) \times (1 - 0.94P_2^\gamma), \quad (3)$$

$$P_{2\text{位置}}^{^{10}\text{B}} = 1 - (1 - P_2^{^4\text{He}}) \times (1 - P_2^{^7\text{Li}}). \quad (4)$$

对自然丰度的 Gd 元素而言, 次级粒子主要是内转换电子和级联 γ 射线, 其中内转换电子的出射概率为 0.794^[16], 因此有

$$P_{2\text{数量}}^{\text{natGd}} = 1 - (1 - 0.794P_2^{\text{ce}}) \times (1 - P_2^\gamma), \quad (5)$$

$$P_{2\text{位置}}^{\text{natGd}} = 1 - (1 - 0.794P_2^{\text{ce}}). \quad (6)$$

针对 P_3 , 本文中认为次级粒子轰击通道壁产生的电子被探测系统收集的概率为 1. 实际上, 通道壁上次级粒子激发产生的电子具有能量分布, 低能量电子不易被放大或放大后能量较低; 另外, 靠近 MCP 板底端的激发电子经电场放大后得到雪崩电子能量较低, 这些低能量电子由于电子学读出系统的阈值限制往往不会被记录到, 因此 P_3 实际上不完全为 1. 本文计算对于读出部分的考虑是近似的.

4 计算结果

本文计算的热中子敏感 MCP 板, 其几何参数主要依据现有市面上普通 MCP 的几何参数, 单元栅格尺寸为 $15\text{ }\mu\text{m}$, MCP 板厚度为 0.4 mm , 通道分布模式主要为方形何蜂巢形. 对掺杂型 MCP 板, 为了与 Tremsin 团队^[5] 的计算相对应, 掺杂物质为 15% mol 比例的 $^{10}\text{B}_2\text{O}_3$ 和 3% mol 比例的自然丰度 Gd_2O_3 , 通道直径从 $4.0\text{--}14\text{ }\mu\text{m}$. 对

镀膜型 MCP 板, 镀膜物质为纯的 $^{10}\text{B}_2\text{O}_3$ 和自然丰度 Gd_2O_3 , 考虑到可拥有较大的镀膜厚度范围, 镀膜基底的通道直径设定为 $14\text{ }\mu\text{m}$, 镀膜厚度 $0.1\text{--}5.0\text{ }\mu\text{m}$. 本文的计算中, MCP 板通道中心轴线与 MCP 板法线的夹角为 8° , 热中子平行束垂直轰击 MCP 表面.

对掺杂型 MCP 板和镀膜型 MCP 板, 有计算探测效率 P_1 的计算结果见图 2 和图 3. 其中, 掺杂型 MCP 板的掺杂物质为 15% mol 比例的 $^{10}\text{B}_2\text{O}_3$ 和 3% mol 比例的自然丰度 Gd_2O_3 , 镀膜型 MCP 的镀膜物质为纯 $^{10}\text{B}_2\text{O}_3$ 和自然丰度 Gd_2O_3 . 计算结果表明, 和理论分析预期相对应, 掺杂型 MCP 板随着通道直径增大, 探测效率 P_1 减小. 镀膜型 MCP 板随着镀膜厚度增大, 探测效率 P_1 增大. 相比较而言, 自然丰度的 Gd_2O_3 相比 $^{10}\text{B}_2\text{O}_3$ 有更好的中子阻挡能力, 在掺杂浓度较低或者镀膜厚度较小时便能够得到很高探测效率 P_1 .

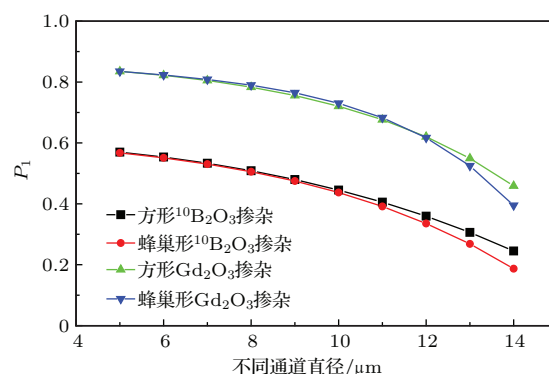


图2 (网刊彩色) 掺杂型 MCP 板随着通道直径增大的 P_1 计算结果

Fig. 2. (color online) P_1 with change of channel diameter for doped MCP.

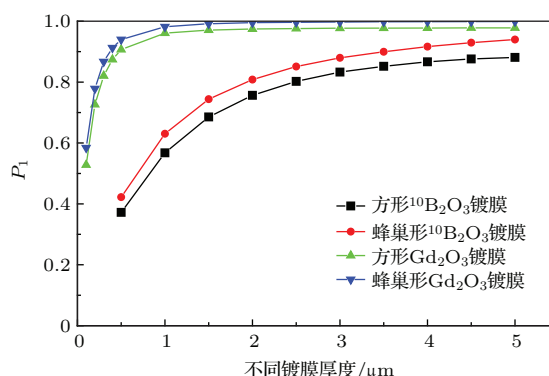


图3 (网刊彩色) 镀膜型 MCP 板随着镀膜厚度增大的 P_1 计算结果

Fig. 3. (color online) P_1 with change of coated thickness for coated MCP.

对掺杂型 MCP 板和镀膜型 MCP 板, 有计算探测效率 P_2 的计算结果见图 4 和图 5. 中子敏感物

质和的 P_1 计算相同. 可以看到, 掺杂型 MCP 板随着通道直径增大, 探测效率 P_2 增大. 镀膜型 MCP 板随着镀膜厚度增大, 探测效率 P_2 减小. 特别地, 相比 $^{10}\text{B}_2\text{O}_3$, 同等情况下 Gd_2O_3 其探测效率 P_2 随着通道直径或者镀膜厚度的增大, 其变化趋势更为缓慢.

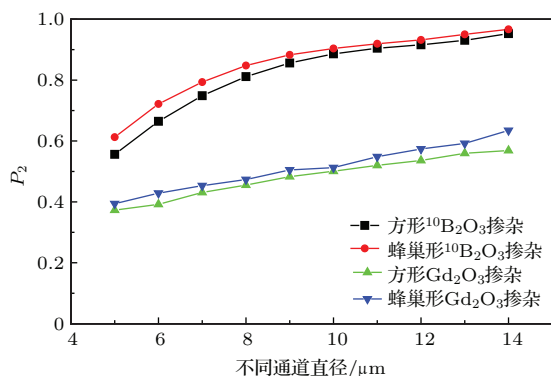


图4 (网刊彩色) 掺杂型 MCP 板随着通道直径增大的 P_2 计算结果

Fig. 4. (color online) P_2 with change of channel diameter for doped MCP.

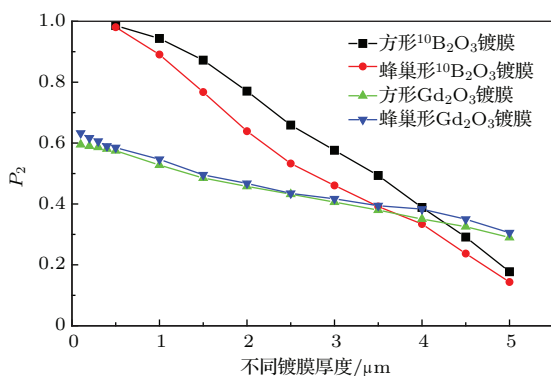


图5 (网刊彩色) 镀膜型 MCP 板随着镀膜厚度增大的 P_2 计算结果

Fig. 5. (color online) P_2 with change of coated thickness for coated MCP.

综合考虑 P_1 和 P_2 , 可以得到总的探测效率 P 的计算结果见图6和图7. 由于两种探测效率随着几何参数的改变其变化趋势刚好相反, 对掺杂型 MCP 板和镀膜型 MCP 板而言, 其热中子探测效率均存在峰值.

对掺杂型 MCP 板而言, 根据掺杂物质的不同, 总探测效率的峰值出现时通道直径略有不同. 对掺杂 15% mol 比例的 $^{10}\text{B}_2\text{O}_3$ 而言, 总探测效率峰值出现在通道直径为 8.0 μm 时; 对掺杂 3% mol 比例的自然丰度 Gd_2O_3 而言, 总探测效率峰值出现在通道直径为 9.0 μm 时. 另外, 掺杂 15% mol 比例的

$^{10}\text{B}_2\text{O}_3$ 能够得到超过 40% 的总探测效率, 掺杂 3% mol 比例的自然丰度 Gd_2O_3 的总探测效率也能接近 30%.

同样地, 对镀膜型 MCP 板而言, 根据镀膜物质的不同, 总探测效率的峰值出现时镀膜厚度也有差异. 对镀膜 $^{10}\text{B}_2\text{O}_3$ 而言, 总探测效率峰值出现在镀膜厚度为 1.5 μm 时; 对镀膜自然丰度 Gd_2O_3 而言, 总探测效率峰值出现在镀膜厚度为 0.5 μm 时. 另外, 镀膜 $^{10}\text{B}_2\text{O}_3$ 能够得到接近 60% 的总探测效率, 镀膜自然丰度 Gd_2O_3 的总探测效率也能超过 50%.

比较两种中子敏感型 MCP, 可以看到镀膜型 MCP 能够在较低的镀膜厚度时, 获得较高的热中子探测效率. 相比而言, 掺杂型 MCP 板要获得与镀膜型 MCP 板相同的热中子探测效率, 需要增大掺杂物质的浓度或者 MCP 板的总厚度. 不过考虑到加工工艺问题, 镀膜型 MCP 板加工难度更大. 两种类型的中子敏感 MCP 板均有其优劣.

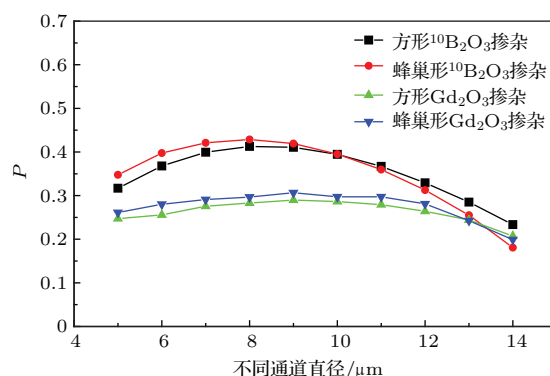


图6 (网刊彩色) 掺杂型 MCP 板随着通道直径增大的 P 计算结果

Fig. 6. (color online) P with change of channel diameter for doped MCP.

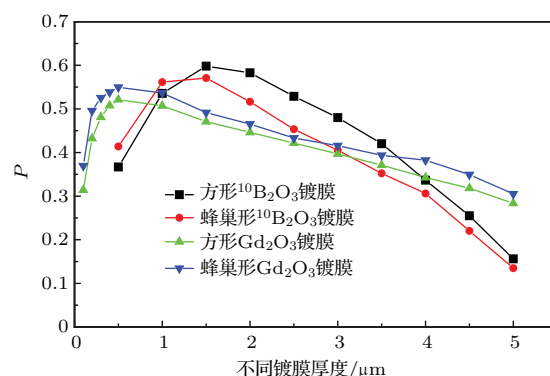


图7 镀膜型 MCP 板随着镀膜厚度增大的 P 计算结果

Fig. 7. P with change of coated thickness for coated MCP.

5 结 论

本文利用蒙特-卡罗程序,对掺杂型和镀膜型两种热中子敏感MCP板进行了建模.通过计算在不同MCP板通道的分布、不同掺杂(镀膜)物质随着通道直径(镀膜厚度)变化下的热中子吸收概率和次级粒子逃逸概率,得到了两种中子敏感MCP板的总的热中子探测效率.计算结果表明,热中子敏感MCP板的热中子探测效率主要取决于掺杂(镀膜)材料和通道直径(镀膜厚度),与MCP板的通道分布关系不大.MCP板厚度为0.4 mm,栅格尺寸为15 μm 时,对 $^{10}\text{B}_2\text{O}_3$ 材料,掺杂型MCP板的热中子探测效率在通道直径为8.0 μm 时可以超过40%,镀膜型MCP板的热中子探测效率在镀膜厚度为1.5 μm 时可以接近60%.对 Gd_2O_3 材料,掺杂型MCP板的热中子探测效率在通道直径为9.0 μm 时可以超过30%,镀膜型MCP板的热中子探测效率在镀膜厚度为0.5 μm 时可以超过50%.

参考文献

- [1] Tremsin A S, McPhate J B, Vallerger J V, Siegmund O W, Kockelmann W, Schooneveld E M, Rhodes N J, Feller W B 2011 *IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record* Valencia, Spain, Oct. 23–29, 2011 p1501
- [2] Cao C, Li H, Huo H Y, Tang K, Sun Y 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 162801 (in Chinese) [曹超, 李航, 霍合勇, 唐科, 孙勇 2013 物理学报 **62** 162801]
- [3] Wang S, Zou Y B, Wen W W, Li H, Liu S Q, Wang H, Lu Y R, Tang G Y, Guo Z Y 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 128801 (in Chinese) [王胜, 邹宇斌, 温伟伟, 李航, 刘树全, 王浒, 陆元荣, 唐国有, 郭之虞 2013 物理学报 **62** 128801]
- [4] Tremsin A S, Feller W B, Downing R G, Mildner D R 2004 *U. S. Government Work not Protected by U. S. Copyright* p340
- [5] Tremsin A S, Feller W B, Downing R G 2005 *Nucl. Instr. Meth. A* **539** 278
- [6] Tremsin A S, Vallerger J V, McPhate J B, Siegmund O W, Hull J S, Feller W B, Crow L, Cooper R G 2007 *IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record* 26 Hawaii, USA, Oct. 26–Nov 3, 2007 p270
- [7] Vallerger J, McPhate J, Tremsin A, Siegmund O 2008 *Nucl. Instr. Meth. A* **591** 151
- [8] Tremsin A S, Vallerger J V, McPhate J B, Siegmund O W, Feller W B, Crow L, Cooper R G 2008 *Nucl. Instr. Meth. A* **592** 374
- [9] Tremsin A S, McPhate J B, Vallerger J V, Siegmund O W, Hull J S, Feller W B, Lehmann E 2009 *Nucl. Instr. Meth. A* **604** 140
- [10] Tremsin A S, Mühlbauer M J, Schillinger B, McPhate J B, Vallerger J V, Siegmund O W, Feller W B 2009 *IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record* Orlando, USA, Oct. 25–31, 2009 p4026
- [11] Tremsin A S, McPhate J B, Vallerger J V, Siegmund O W, Hull J S, Feller W B, Lehmann E 2009 *Nucl. Instr. Meth. A* **605** 103
- [12] Lu N H, Yang Y G 2010 *The 15th Academic Annual Conference of Chinese Nuclear Electronics and Nuclear Detection Technology* Guiyang, China, August 13–18, 2010 p332 (in Chinese) [陆年华, 杨祎昱 2010 第十五届全国核电子学与核探测技术学术年会论文集 贵阳 8月13–18日, 2010 第332页]
- [13] Tian Y, Lu N H, Yang Y G, Huang W Q 2011 *IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record* Valencia, Spain, Oct. 23–29, 2011 p196
- [14] Lü N H, Yang Y G, Lü J W, Pan J S, Liang M C, Wang X W, Li Y J 2012 *Phys. Proced.* **26** 61
- [15] Pan J, Yang Y, Tian Y, Zeng M, Deng T, Xu W, Han X, Sun S, Lü J 2013 *JINST* **8** 01015
- [16] Sei M, Tatsuya N, Hideshi Y 2003 *Nucl. Instr. Meth. A* **513** 538

Optimal calculation of detection efficiency for thermal neutron sensitive microchannel plate*

Wang Sheng[†] Li Hang Cao Chao Wu Yang Huo He-Yong Tang Bin

(Institute of Nuclear Physics and Chemistry, CAEP, Mianyang 621900, China)

(Received 25 September 2014; revised manuscript received 3 November 2014)

Abstract

The traditional digital imaging of neutron radiography is based on neutron scintillation screen cooperated with charge coupled device (CCD) camera, whose spatial resolution and neutron detection efficiency are contradictory. Neutron detection method based on microchannel plates (MCP) could solve the problem appearing in traditional method. It could supply high spatial resolution, high neutron detection efficiency and high time resolution. It is of benefit to high-resolution neutron radiography and neutron energy choice imaging. Tremsin et al. [Tremsin A S, Feller W B, Downing R G, Mildner D R 2004 *U. S. Government Work not Protected by U. S. Copyright* p340] calculated the detection efficiency of thermal neutron sensitivity MCP in 2004. Then his team fabricated a prototype of neutron detection system based on MCP and carried out the neutron imaging experiments on several neutron sources. The experimental results show that spatial resolution is nearly 15 μm and neutron detection efficiency for cold neutron is more than 70%. In China, Yang Y G et al. [15] from Tsinghua University developed a neutron detection system based on MCP, and preliminary neutron experimental results indicate that spatial resolution is about 200 μm .

In order to find the optimal structure of MCP, in this paper we calculate the detection efficiency of thermal neutron sensitive MCP doped (or coated) by boron and gadolinium with Monte-Carlo method. The neutron detection efficiency P is determined by three terms P_1 , P_2 and P_3 , which are related by $P = P_1 \times P_2 \times P_3$. Here, P_1 is the possibility that the neutrons are absorbed by MCP solid parts, P_2 is the possibility that the secondary particle escapes into MCP channel and generates an electron avalanche, and P_3 is the possibility that the electron avalanche is recorded by readout system. Theoretical analysis indicates that more solid parts of MCP can make P_1 higher and increase the difficulty for secondary particle to escape, and make P_2 lower. There may be an optimal geometry to make the total P maximal. This paper gives the calculation method of P_1 and P_2 , and approximates P_3 to 1.

The calculation results show that the neutron detection efficiency depends on channel diameter (or coated thickness) and material, but not on the structure of MCP. When the thickness of MCP is 0.4 mm, the pixel of MCP is 15 μm , and the neutron sensitivity material is $^{10}\text{B}_2\text{O}_3$, the optimal thermal neutron detection efficiency is more than 40% with a channel diameter of 8.0 μm for the doped MCP, and it is nearly 60% with a coated thickness of 1.5 μm for the coated MCP. With the same geometry parameters and the neutron sensitive material such as natural Gd_2O_3 , the optimal thermal neutron detection efficiency is more than 30% with a channel diameter of 9.0 μm for the doped MCP, and it is more than 50% with a coated thickness of 0.5 μm for the coated MCP.

Keywords: thermal neutron detection, microchannel plates, Monte-Carlo simulation, optimize calculation

PACS: 28.20.Pr, 28.41.AK, 52.65.Pp

DOI: 10.7498/aps.64.102801

* Project supported by the National High Technology Research and the Science Foundation of China Academy of Engineering Physics, China (Grant No. 2014B0103007), the Fund of Key Laboratory of Neutron Physics, China (Grant Nos. 2013CB01, 2012BB03) and the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11205138, 11375156).

[†] Corresponding author. E-mail: mrtn5851@gmail.com