



镀膜型¹⁸MCP探测效率和位置分辨优化的蒙特卡罗模拟研究

张连军 周健荣 杨建清 谭金昊 宋玉收 孙志嘉

Monte Carlo Simulation Study on Optimization of Detection Efficiency and Spatial Resolution of Coated ¹⁸MCP

ZHANG Lianjun, ZHOU Jianrong, YANG Jianqing, TAN Jinhao, SONG Yushou, SUN Zhijia

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.38.2020058>

引用格式:

张连军, 周健荣, 杨建清, 谭金昊, 宋玉收, 孙志嘉. 镀膜型¹⁸MCP探测效率和位置分辨优化的蒙特卡罗模拟研究[J]. 原子核物理评论, 2021, 38(2):190–195. doi: 10.11804/NuclPhysRev.38.2020058

ZHANG Lianjun, ZHOU Jianrong, YANG Jianqing, TAN Jinhao, SONG Yushou, SUN Zhijia. Monte Carlo Simulation Study on Optimization of Detection Efficiency and Spatial Resolution of Coated ¹⁸MCP[J]. Nuclear Physics Review, 2021, 38(2):190–195. doi: 10.11804/NuclPhysRev.38.2020058

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

中国散裂中子源小角中子散射谱仪探测器研制

Small Angle Neutron Scattering Spectrometer Detector of China Spallation Neutron Source

原子核物理评论. 2019, 36(2): 204–210 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.36.02.204>

用于GPPD谱仪的大面积闪烁体中子探测器性能测试

Performance Test of the Array Scintillator Detector with a Large Area for GPPD

原子核物理评论. 2019, 36(2): 190–196 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.36.02.190>

散裂中子源高压二维位置灵敏³He探测器的实验研究

Experimental Study on Two-dimensional Position Sensitive Detector Filled with Helium-3 for the China Spallation Neutron Source

原子核物理评论. 2019, 36(3): 351–356 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.36.03.351>

用于快中子探测的裂变电离室实验及模拟结果比较(英文)

Comparison Between Experiment and Simulation for the Fission Chamber Used in Fast Neutron Detection

原子核物理评论. 2019, 36(4): 471–476 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.36.04.471>

THGEM探测器X光斑寻迹和位置分辨实验研究

Research on the X-ray Spot Tracing and the Position Resolution of THGEM Detector

原子核物理评论. 2018, 35(1): 61–65 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.35.01.061>

新型M-THGEM结构探测器的蒙特卡罗模拟研究

Monte Carlo Simulation on the Novel M-THGEM Detector

原子核物理评论. 2019, 36(1): 85–90 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.36.01.085>

文章编号: 1007-4627(2021)02-0190-06

镀膜型¹⁰B-MCP 探测效率和位置分辨优化的蒙特卡罗模拟研究

张连军^{1,2,3}, 周健荣^{2,3,†}, 杨建清^{2,3,4}, 谭金昊^{1,2,3}, 宋玉收^{1,†}, 孙志嘉^{2,3,†}

(1. 哈尔滨工程大学, 哈尔滨 150000;

2. 散裂中子源科学中心, 广东 东莞 523803;

3. 核探测与核电子学国家重点实验室, 中国科学院高能物理研究所, 北京 100049;

4. 西安高新技术研究所, 西安 710025)

摘要: 中子敏感微通道板 (Neutron sensitive microchannel plate, ¹⁰B-MCP) 因其具有高探测效率和位置分辨, 配合先进的读出电子学可作为能量分辨中子成像探测器的优先选择。相比于基体掺杂型的¹⁰B-MCP, 基于原子层沉积技术 (Atomic Layer Deposition, ALD) 的¹⁰B-MCP 具有原材料消耗少、通道内壁具有高的二次电子发射系数等优势。首先, 通过实验对掺杂^{nat}Gd 型¹⁰B-MCP 的典型中子和伽马信号进行研究。然后, 采用 Geant4 模拟和理论计算对镀膜¹⁰B₂O₃ 型¹⁰B-MCP 的孔径、壁厚、倾角和镀膜厚度进行优化。计算结果表明, 当¹⁰B-MCP 的几何参数选择为镀膜厚度 1 μm、孔径 10 μm、壁厚 1 μm 以及倾角 3° 时, ¹⁰B-MCP 性能达到约 56% 的热中子探测效率和约 22 μm 的位置分辨。计算结果对 CSNS 能量选择中子成像探测器¹⁰B-MCP 的几何参数设计具有重要意义。

关键词: 中国散裂中子源; ¹⁰B-MCP; 探测效率; 位置分辨; 优化计算

中图分类号: TL816⁺.3

文献标志码: A

DOI: 10.11804/NuclPhysRev.38.2020058

1 引言

中子束穿过物体时会发生衰减, 当中子入射到物质后, 与物质中的原子核相互作用, 导致透射后的中子强度及其分布发生变化。因此可以利用中子成像技术, 呈现出物质的微观结构信息。中国散裂中子源 (CSNS) 的设计功率为 100 kW, 脉冲频率为 25 Hz, 已于 2018 年 8 月向用户开放运行^[1]。根据 CSNS 谱仪发展规划, 拟建设一台能量分辨中子成像谱仪 (Energy Resolved Neutron Imaging, ERNI), 它能结合中子飞行时间实现多参量、多维度、多尺寸信息测量, 满足先进材料研发、新能源和器件、装备和部件服役性能和寿命等高新技术产业领域的应用需求^[2-4]。

中子敏感微通道板 (Neutron sensitive microchannel plate, ¹⁰B-MCP) 因其具有高的探测效率和位置分辨以及优异的时间分辨能力, 配合先进的读出电子学可实现能量分辨中子成像, 成为 CSNS-ERNI 探测器的优先选择。¹⁰B-MCP 最早是由 Fraser 等^[5]发明的一种微通道电子倍增器件, 常见的 MCP 具有六边形通道排布的蜂

巢结构, 通道轴线与法线具有一定的夹角以增加电子倍增概率。普通 MCP 可以通过基体掺杂和孔道镀膜中子灵敏核素 (¹⁰B、⁶Li 和 ^{nat}Gd) 这两种方式实现中子敏感特性, 进而制备¹⁰B-MCP。近年来基于¹⁰B-MCP 的中子探测器得到了快速发展, 美国加州大学伯克利分校课题组^[6-8]利用含有¹⁰B 的氧化物构成玻璃成分制作出基体掺杂型¹⁰B-MCP, 在美国散裂中子源 (SNS) 和英国散裂中子源 (ISIS) 进行多次实验, 采用 Timepix 芯片作为读出电子学获得约 21% 的热中子探测效率、约 70% 的冷中子探测效率以及好于 15 μm 的空间分辨。国内方面, 清华大学的杨祎罡团队^[9-10]与北方夜视的潘京生合作对基体掺杂型¹⁰B-MCP 探测器进行研究, 在采用延迟线读出条件下获得约 34% 的热中子探测效率和 *x* 轴方向 65.6 μm、*y* 轴方向 63.7 μm 的位置分辨。美国 NOVA 公司最早将镀膜技术应用于 MCP 的生产, 使镀膜技术在¹⁰B-MCP 的制备领域成为可能^[11]。清华大学的 Lu 等^[12]对镀膜型¹⁰B-MCP 探测器的模拟研究发现, 当镀膜厚度在 0.1~1 μm 之间时对热中子达到最高 70% 的探测效率, 同时成功制备了约 208 nm 厚的 ALD-^{nat}Gd₂O₃ 的中子

收稿日期: 2020-08-22; 修改日期: 2020-10-02

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2017YFA0403702); 国家自然科学基金资助项目 (U1832119, 11775243); 中央高校基本科研业务费 (3072020CFQ1501, 3072020CFQ1502); 中国科学院青年创新促进会

作者简介: 张连军 (1995-), 男, 内蒙古赤峰人, 硕士研究生, 从事中子探测器研究; E-mail: zhanglianjun@ihep.ac.cn

† 通信作者: 周健荣, E-mail: zhouljr@ihep.ac.cn; 宋玉收, E-mail: songyushou80@163.com; 孙志嘉, E-mail: sunzj@ihep.ac.cn。

敏感镀膜层,但未对该种类型的 ^{10}B MCP开展实验研究。中国工程物理研究院的Wang等^[13]对镀膜型 ^{10}B MCP探测效率进行了模拟,结果显示热中子探测效率可接近60%。

本文主要针对镀膜型 ^{10}B MCP开展蒙特卡罗模拟和理论计算。首先,对掺杂 ^{nat}Gd 型 ^{10}B MCP的典型中子和伽马信号进行实验研究。然后,介绍镀膜型 ^{10}B MCP的工作原理,通过模拟得到探测效率的二维分布以及探测效率随着孔径、壁厚、倾角和镀膜厚度的变化关系。最后采用重心法对位置分辨进行计算,研究位置分辨与倾角和镀膜厚度的关系。

2 传统掺杂钆 ^{10}B MCP的技术瓶颈

当前在高通量的中子束流中,往往会伴随很强的伽马背底,而对典型的中子和伽马信号进行研究有助于后端读出芯片的设计和中性伽马甄别(n/γ)的研究。基于以上两点,对掺杂 ^{nat}Gd 的 ^{10}B MCP开展实验研究,采用北方夜视技术股份有限公司南京分公司(北方夜视)生产的直径50mm、厚度0.6mm、孔径 $10\mu\text{m}$ 、壁厚

$2\mu\text{m}$ 、倾角 8° 并掺杂3% ^{nat}Gd 的 ^{10}B MCP,以及直径50mm、厚度0.5mm、孔径 $12\mu\text{m}$ 、壁厚 $2\mu\text{m}$ 、倾角 7° 的普通MCP,双片堆叠形成“V-Stack”使用。CSNS是由一台80MeV负氢直线加速器、一台1.6GeV快循环质子同步加速器将质子加速至1.6GeV后轰击钨靶产生散裂中子,经慢化器、中子导管等将强度约为 $10^7\text{n}/(\text{cm}^2\cdot\text{s})$ 的热中子束流引入BL20号束线。如图1(a)所示,束流出口的中子束流经单色器偏转 45° 后入射至 ^{10}B MCP探测器,在双片MCP电压-1987V条件下,根据飞行时间的方法使用示波器采集阳极板输出的典型中子和 γ 信号进行分析。如图1(b)所示,示波器采集的典型中子和 γ 信号经数据处理后得到中子信号约35mV、 γ 信号约39mV,且中子和 γ 信号的宽度几乎相近。针对二者信号特征,一方面我们可以针对信号特征设计 ^{10}B MCP探测器后端读出芯片,另一方面由于中子和 γ 信号的幅度和宽度相差不大,使得通过信号幅度这一方案来实现 n/γ 非常困难。对于加速器驱动型的散裂中子源由于 γ 射线的飞行速度远远大于中子的飞行速度,因此可以考虑采用飞行时间法(TOF)这一方案来实现 n/γ 。

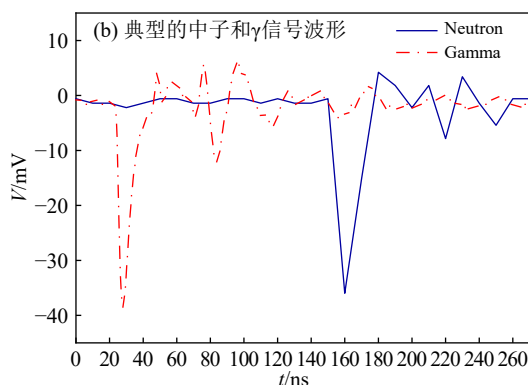
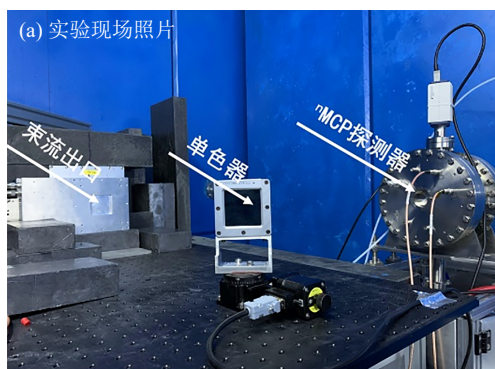


图1 (在线彩图) 典型中子和 γ 信号波形采集实验

3 镀膜 ^{10}B MCP的工作原理

基体掺杂方式制作的 ^{10}B MCP会消耗大量的中子灵敏原材料,从而增加 ^{10}B MCP的制造成本。近年来针对镀膜型 ^{10}B MCP的研究逐渐增加,相对于基体掺杂型,镀膜型 ^{10}B MCP具有原材料消耗少、无需氢还原工艺、通道内壁具有高的二次电子发射系数等优点。通过在普通MCP孔道内壁镀膜 $^{10}\text{B}_2\text{O}_3$ 使其具有中子灵敏特性,采用低增益的镀膜 $^{10}\text{B}_2\text{O}_3$ -MCP与高增益的传统MCP配合使用,期望可以解决 n/γ 的问题^[14]。图2为镀膜型 ^{10}B MCP的结构,单个 ^{10}B MCP孔道由内到外镀膜顺序为中子敏感层、导电层和二次电子发射层。对于镀膜 $^{10}\text{B}_2\text{O}_3$ 的 ^{10}B MCP,中子探测过程涉及几个独立的级联过

程(如图3),各反应道及其分支比如式(1)所示:

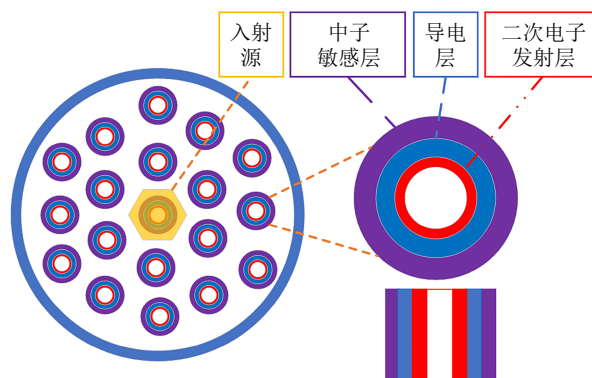


图2 (在线彩图) 镀膜型 ^{10}B MCP示意图

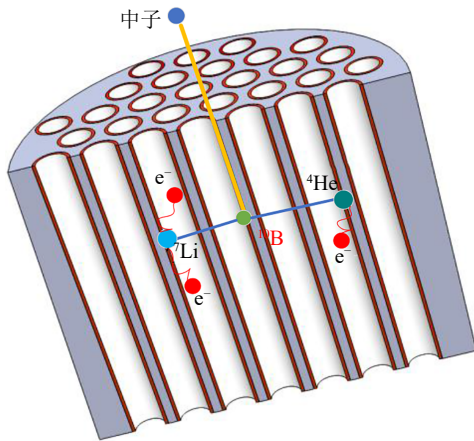


图 3 (在线彩图) 中子探测示意图

$$\begin{cases} n + {}^{10}\text{B} \rightarrow {}^4\text{He} (1.8 \text{ MeV}) + {}^7\text{Li} (1.0 \text{ MeV}), & 6\% \\ n + {}^{10}\text{B} \rightarrow {}^4\text{He} (1.47 \text{ MeV}) + {}^7\text{Li} (0.83 \text{ MeV}) + \gamma (0.48 \text{ MeV}), & 94\% \end{cases} \quad (1)$$

入射中子被中子敏感核素 ${}^{10}\text{B}$ 吸收产生 ${}^4\text{He}$ 的射程为 $3.54 \mu\text{m}$ (1472 keV) 和 $4.23 \mu\text{m}$ (1777 keV), ${}^7\text{Li}$ 的射程为 $1.91 \mu\text{m}$ (838 keV) 和 $2.15 \mu\text{m}$ (1014 keV)^[15]。次级粒子 ${}^4\text{He}$ 和 ${}^7\text{Li}$ 以相反的方向发射, 并以一定的概率穿过导电层、二次电子发射层和 ${}^{\text{a}}\text{MCP}$ 基体进入孔道, 在孔道电场的作用下轰击二次电子发射层进行倍增, 继而被电子学探测。本文探测效率 (P) 定义为

$$P = P_1 \times P_2 \times P_3, \quad (2)$$

其中 P_1 是中子被 ${}^{10}\text{B}$ 俘获的概率, P_2 是带电粒子穿过导电层、二次电子发射层和 ${}^{\text{a}}\text{MCP}$ 基体进入孔道的概

率, P_3 是带电粒子发生倍增并被电子学探测的概率。

对于中子吸收概率 P_1 满足下式:

$$P_1 = 1 - \exp(-l_{\text{eff}} N \sigma), \quad (3)$$

其中: l_{eff} 为中子在镀膜层中穿行的有效距离; $N\sigma$ 为 ${}^{10}\text{B}$ 的宏观截面。中子与 ${}^{10}\text{B}$ 反应产生的次级粒子 α 和 ${}^7\text{Li}$ 由于射程的存在会以反应点为中心呈 4π 方向发射, 二者有一定的概率穿越 ${}^{\text{a}}\text{MCP}$ 基体进入孔道。模拟时认为进入孔道的次级粒子一定会发生倍增并被电子学探测, 因此在本文的模拟计算中认为 $P_3=1$ 。

4 镀膜 ${}^{\text{a}}\text{MCP}$ 的探测效率和位置分辨

4.1 探测效率

本文对于 ${}^{\text{a}}\text{MCP}$ 探测效率和位置分辨的模拟采用 Geant4 蒙特卡罗模拟软件, Geant4 是由欧洲核子中心 CERN 基于 C++ 语言开发的一套开源的蒙特卡罗模拟软件, 它主要用于模拟基本粒子穿过物质时发生的相互作用, 在核科学与技术领域有着广泛的应用^[16]。如图 4 所示, ${}^{\text{a}}\text{MCP}$ 的模拟包含几何模型构建、物理过程模拟和性能计算三部分。几何模型的建模包含 ${}^{\text{a}}\text{MCP}$ 的直径、厚度、孔径 (d)、壁厚 (w)、倾角 (θ) 和镀膜厚度 (D), 基体材料的选择参考北方夜视, 镀膜 96% 的 ${}^{10}\text{B}_2\text{O}_3$ 形成 ${}^{\text{a}}\text{MCP}$ ^[9]。如图 2 所示, 中子源选择边长为孔径与二分之一壁厚之和刚好覆盖 ${}^{\text{a}}\text{MCP}$ 最小周期垂直入射的六边形热中子源。物理模型选择 QGSP_BIC_HP 高精度模型, 将其电磁过程替换为 EMLivemore 模型, 以增

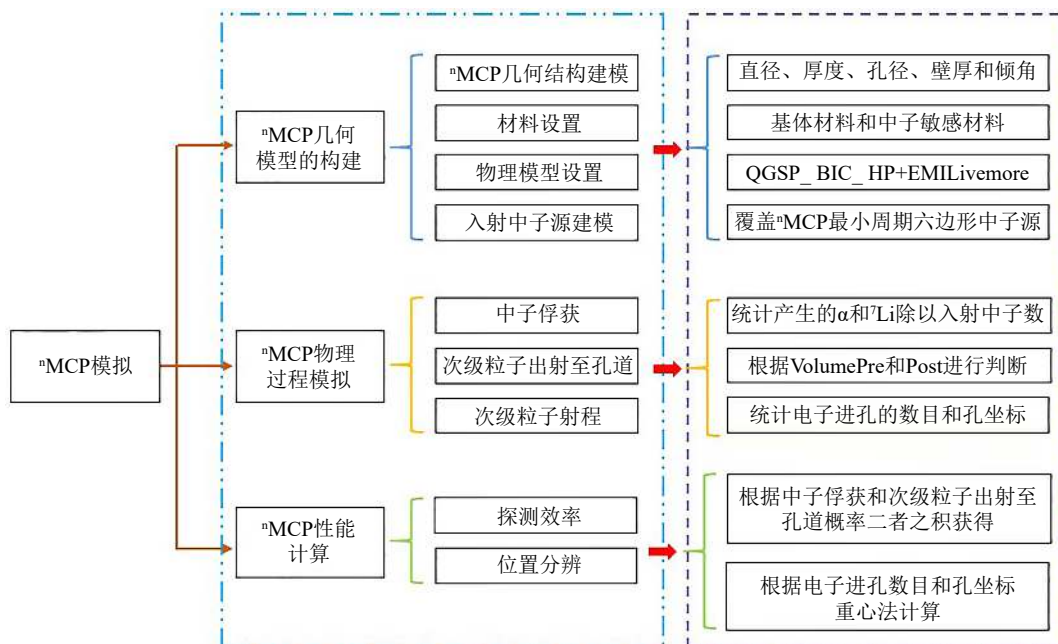


图 4 (在线彩图) ${}^{\text{a}}\text{MCP}$ 探测效率和位置分辨 Geant4 模拟优化流程

加模拟计算的精确度^[16]。探测效率的计算主要涉及的物理过程包括中子俘获和次级粒子进入孔道这两个过程, 本文认为 ^{10}B 与中子反应产生的 α 和 ^7Li 进入孔道即可被探测。位置分辨的计算涉及到次级粒子的射程, 统计 α 和 ^7Li 进入各个孔道的数目和孔道坐标, 根据重心法重建位置。根据探测效率和位置分辨的模拟计算结果改变几何参数进行优化, 获得达到最优性能时 ^{10}B MCP的优化几何参数。

在 ^{10}B MCP厚度为0.6 mm时, 本文重点研究 ^{10}B MCP

的 d 、 w 、 θ 和 D 参数对探测效率 P 的影响。如图5(a)和(b)所示, 随着 D 增加、 d 和 w 的减小, 中子吸收效率 P_1 逐渐增大, 然后趋于平稳。这是由于当 D 增加、 d 和 w 减小时, ^{10}B MCP的镀膜面积占比增大, 进而 P_1 概率会随之变大, 当 D 达到2 μm 后, P_1 几乎不再变化。如图5(c)所示, 当倾角 $\theta=0^\circ$ 时, 由于中子束流垂直 ^{10}B MCP端面入射, 此时很多入射中子直接穿过孔道而没有被 ^{10}B 吸收, 当 θ 增大时, P_1 概率会迅速增大然后趋近于1, 此时入射中子几乎全部被中子敏感核素 ^{10}B 吸收。

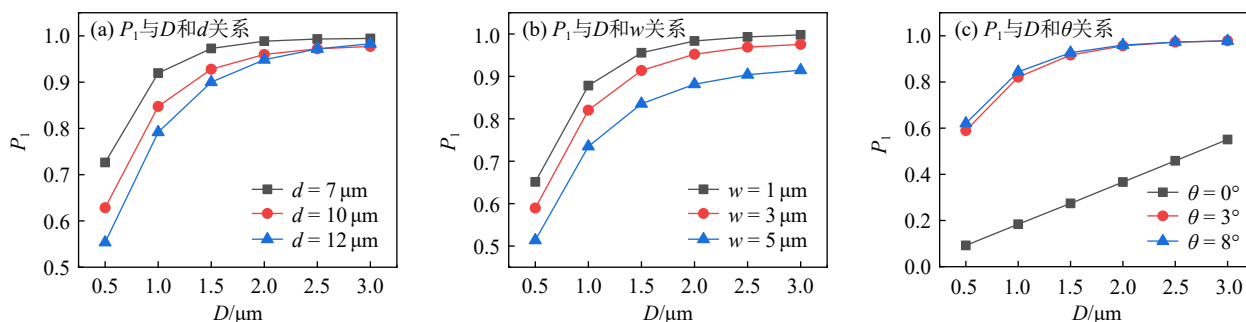


图5 (在线彩图) 效率 P_1 与镀膜厚度 D 和孔径 d 、壁厚 w 、倾角 θ 的关系

如图6所示, D 增加时 P_2 逐渐减小, 此时中子与 ^{10}B 反应产生的 ^4He 和 ^7Li 以各自的射程沿着相反的方向发射, 而 D 的增加会导致 ^4He 和 ^7Li 的进孔概率下降, 从而会导致 P_2 的下降。图6(a)可以看到, d 增加时 P_2 会增加, 这是由于在 w 不变 d 增加的情况下, ^{10}B MCP的基体面积占比减小, 进而 ^4He 和 ^7Li 进孔的概率随之增

加所致。图6(c)可以得到, θ 对于 P_2 的影响较小, 这是由于次级粒子是沿着 4π 空间出射造成的, 因此 ^{10}B MCP的倾角 θ 对其几乎没有影响。

下面分析不同中子吸收位置对 P_2 的影响。如图7(a)、(b)和(c)所示, α 、 ^7Li 和 $(\alpha, ^7\text{Li})$ 出射粒子均在靠近孔道一侧具有高的 P_2 概率, 相比于 ^7Li , α 具有更广泛

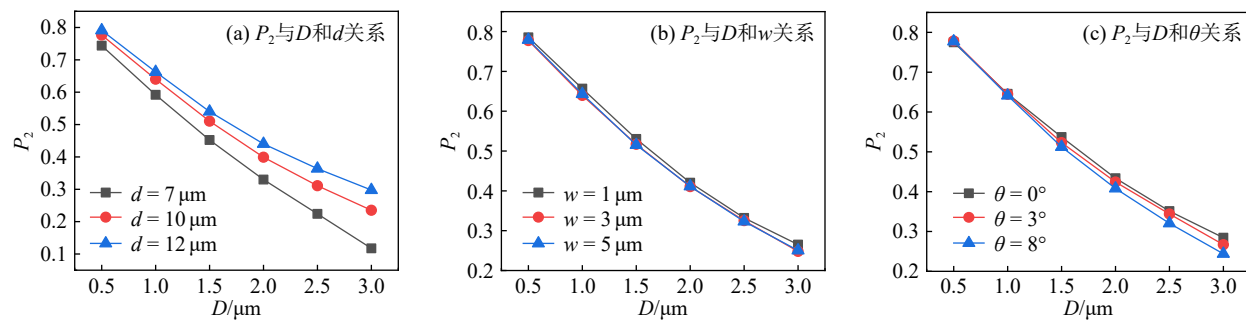


图6 (在线彩图) 效率 P_2 与镀膜厚度 D 和孔径 d 、壁厚 w 、倾角 θ 的关系

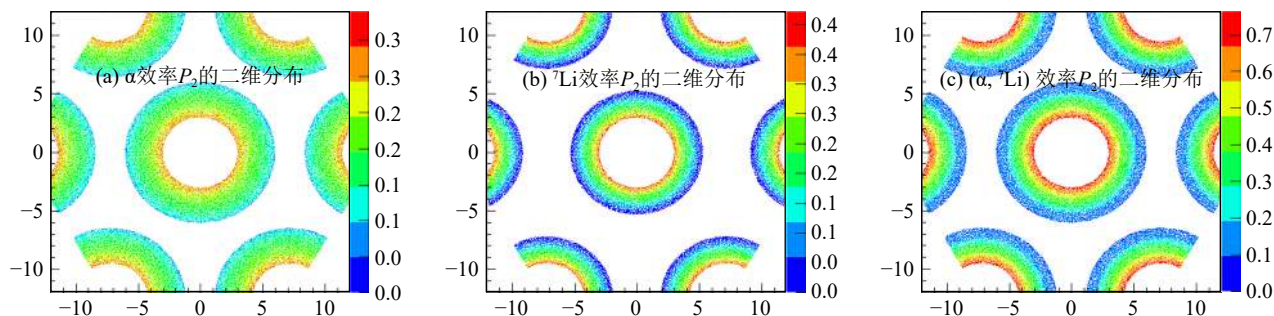


图7 (在线彩图) 理论计算下 α 、 ^7Li 和出射粒子 $(\alpha, ^7\text{Li})$ 效率 P_2 的二维分布

的位置分布,这也说明了图 6(b)中当 D 相同时, w 对于 P_2 的概率影响较小。 D 增加时,反而会导致靠近孔壁的一侧概率逐渐下降,此时靠近孔道一侧反应产生的 α 或 ${}^7\text{Li}$ 很难出射至相邻的孔道,从而会导致总的 P_2 下降。另一方面,由于 ${}^{10}\text{B}$ 价格较为昂贵,当 D 增加时会增加 ${}^{10}\text{B}$ MCP 的制作成本。因此合理地控制 D 既可以控制生产成本又可以提升 ${}^{10}\text{B}$ MCP 的性能。

根据式 (2) 对 P 的定义以及图 5 和图 6 对 P_1 、 P_2 的模拟结果可知,随着 D 的增加, ${}^{10}\text{B}$ MCP 的 P 存在一个最

优值。如图 8(a)、(b) 和 (c), 当 D 为 $1\mu\text{m}$ 时, P 达到最大值。在同一 D 下, P 会随着 d 的增加而增加,这是由于此时 ${}^{10}\text{B}$ MCP 的基体面积占比减小,镀膜层反应产生的出射粒子更容易进入相邻的孔道倍增,继而 P 会增加。图 8(b) 所示, w 增加时 P 减小,这是由于此时中子与 ${}^{10}\text{B}$ 反应产生的次级带电粒子穿透孔壁进入相邻的孔道的概率降低。由于图 5(c) 中 P_1 随着 θ 的从无到有迅速增加,因此会导致图 8(c) 中 P 会随着 θ 的增加迅速增加。

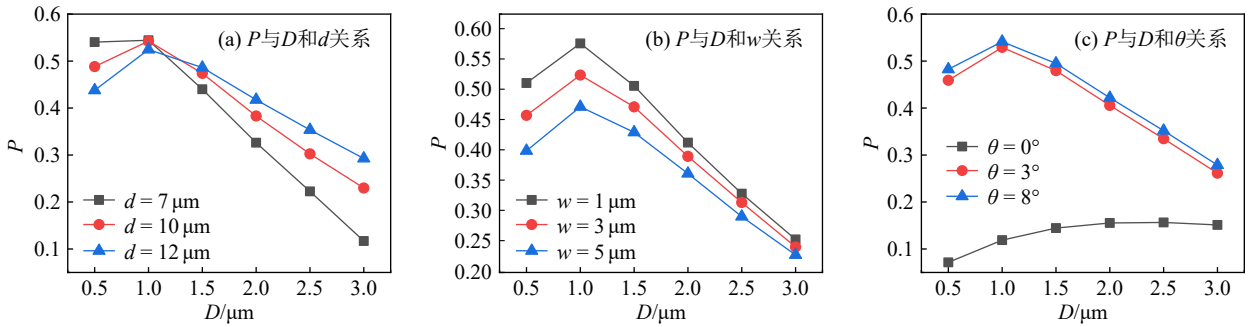


图 8 (在线彩图) 效率 P 与镀膜厚度 D 和孔径 d 、壁厚 w 、倾角 θ 的关系

4.2 位置分辨

由于通道倾角的影响,中子的入射位置与中子吸收位置之间存在偏差。同时,中子吸收后产生的 ${}^4\text{He}$ 和 ${}^7\text{Li}$ 具有一定的射程,进入通道倍增后被电子学探测,这一过程会进一步造成位置探测的偏差。本文采用重心法对位置进行重建,根据电荷分布的 MCP 通道坐标 $[C_n(x, y)]$ 及电荷量,用各个通道的电荷量为权重对电荷重心进行重建表示入射中子位置。假设有 $C_1, C_2 \dots C_n$ 个通道存在电荷数分别为 $q_1, q_2 \dots q_n$, 则电荷重心法重建过程如式 (4) 所示:

$$\begin{aligned} x &= \frac{x_1 \times q_1 + x_2 \times q_2 + \dots + x_n \times q_n}{q_1 + q_2 + \dots + q_n} \\ y &= \frac{y_1 \times q_1 + y_2 \times q_2 + \dots + y_n \times q_n}{q_1 + q_2 + \dots + q_n} \end{aligned} \quad (4)$$

在 ${}^{10}\text{B}$ MCP 厚度 0.6mm 、孔径 $10\mu\text{m}$ 、壁厚 $1\mu\text{m}$ 条件下,本文建立几何模型,讨论 θ 及 D 对位置分辨的影响。利用 Geant4 建立 ${}^{10}\text{B}$ MCP 几何模型时, ${}^{10}\text{B}$ MCP 倾角方向为 x 轴方向,因此 x 轴方向位置分辨会随着 θ 的变化发生改变。如图 9 所示, x 轴方向位置分辨随着 θ 的增加逐渐增加,原因是 θ 的存在会导致垂直入射的中子束流穿越多个通道产生信号,因此 x 轴方向的位置分辨迅速增加。当 D 增加时,由于中子与 ${}^{10}\text{B}$ 反应产生的 α 和 ${}^7\text{Li}$ 穿越多个孔道的概率降低,因此位置分辨会减小。计算结果表明, θ 过大会导致位置分辨变差。综合考虑探测效率和位置分辨的模拟结果,当 ${}^{10}\text{B}$ MCP 的几何参

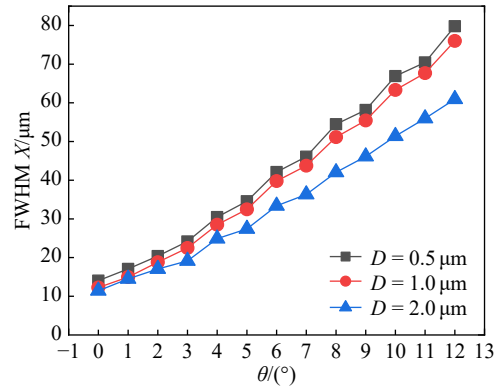


图 9 (在线彩图) x 方向位置分辨与倾角 θ 和镀膜厚度 D 的关系

数选择镀膜厚度为 $1\mu\text{m}$ 、孔径 $10\mu\text{m}$ 、壁厚 $1\mu\text{m}$ 以及倾角 3° , 此时可以达到约 56% 的探测效率和约 $22\mu\text{m}$ 的位置分辨。

5 结论

本文首先对掺杂 ${}^{\text{nat}}\text{Gd}$ 型 ${}^{10}\text{B}$ MCP 的典型中子和 γ 信号开展实验研究,针对信号特征一方面我们可以设计出芯片,另一方面由于中子和 γ 信号幅度和宽度相差很小,使得通过信号幅度来实现 n/γ 这一方案很难实现。采用低增益的 ${}^{10}\text{B}_2\text{O}_3$ -MCP 与高增益的传统 MCP 配合使用,期望可以解决 n/γ 问题。相比于掺杂型,镀膜型 ${}^{10}\text{B}$ MCP 具有高二次电子发射系数、消耗原材料少等优点,选择镀膜型 ${}^{10}\text{B}$ MCP 作为本文的研究对象。然后

介绍镀膜型¹⁰B₂O₃的工作原理, 使用Geant4模拟软件与理论计算的方式对镀膜型¹⁰B₂O₃的探测效率和位置分辨进行模拟研究。结果表明, 当¹⁰B₂O₃的几何参数选择为镀膜厚度1 μm、孔径10 μm、壁厚1 μm和倾角3°时, ¹⁰B₂O₃具有约56%的探测效率和约22 μm的位置分辨。计算结果对ERNI中子探测器的¹⁰B₂O₃几何参数设计具有重要意义。在接下来的工作中, 将针对镀膜¹⁰B₂O₃的¹⁰B₂O₃探测效率、位置分辨和n/γ等性能开展实验研究, 为后续ERNI中子探测器的参数设计提供技术参考。

参考文献:

- [1] ZHOU Jianrong, SUN Zhijia, LIU Ben, et al. *Chinese Physics C*, 2011, 35(07): 668.
- [2] SATO H, MOCHIKI K I, TANAKA K, et al. *Nucl Instr and Meth A*, 2019, 943: 162501.
- [3] TREMSIN A S, VALLERGA J V. *Radiation Measurements*, 2019, 130: 106228.
- [4] KOCKELMANN W, FREI G, LEHMANN E H, et al. *Nucl Instr and Meth A*, 2007, 578(2): 421.
- [5] FRASER G W, PEARSON J F. *T Nucl Instr and Meth A*, 1990, 293(3): 569.
- [6] TREMSIN A S, VALLERGA J V, MCPHATE J B, et al. *Nucl Instr and Meth A*, 2008, 592(3): 374.
- [7] SIEGMUND O H, VALLERGA J V, TREMSIN A S, et al. *Nucl Instr and Meth A*, 2007, 576(1): 178.
- [8] TREMSIN A S, MCPHATE J B, VALLERGA J V, et al. *Nucl Instr and Meth A*, 2011, 628(1): 415.
- [9] WANG Yiming, TIAN Yang, YANG Yigang, et al. *Chinese Physics C*, 2016, 40(09): 106.
- [10] WANG Yiming, YANG Yigang, WANG Xuewu, et al. *Nucl Instr and Meth A*, 2015, 784: 226.
- [11] MANE A U, PENG Q, ELAM J W, et al. *Physics Procedia*, 2012, 37(13): 722.
- [12] LU Nianhua, YANG Yigang, LV Jingwen, et al. *Physics Procedia*, 2012, 26: 61.
- [13] WANG Sheng, LI Hang, CAO Chao, et al. *Acta Physica Sinica*, 2015, 64(10): 83. (in Chinese)
(王胜, 李航, 曹超, 等. *物理学报*, 2015, 64(10): 83.)
- [14] TREMSIN A S, MCPHATE J B, VALLERGA J V, et al. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, 2008, 6945: 69451.
- [15] TREMSIN A S, FELLER W B, DOWNING R G. *Nucl Instr and Meth A*, 2005, 539(1): 278.
- [16] AGOSTINELLI S, ALLISON J, AMAKO K, et al. *Nucl Instr and Meth A*, 2003, 506(3): 250.

Monte Carlo Simulation Study on Optimization of Detection Efficiency and Spatial Resolution of Coated ¹⁰B₂O₃ MCP

ZHANG Lianjun^{1,2,3}, ZHOU Jianrong^{2,3,†}, YANG Jianqing^{2,3,4}, TAN Jinhao^{1,2,3}, SONG Yushou^{1,†}, SUN Zhijia^{2,3,†}

(1. Harbin Engineering University, Harbin 150000, China;

2. Spallation Neutron Source Science Center, Dongguan 523803, Guangdong, China;

3. State Key Laboratory of Particle Detection and Electronics, Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

4. Xi'an Research Institute of Hi-Tech, Xi'an 710025, China)

Abstract: Since neutron sensitive microchannel plates (¹⁰B₂O₃ MCP) has high detection efficiency and the spatial resolution, combined with advanced readout electronics it can be a better choice for energy-resolved neutron imaging detectors. Compared with the matrix-doped ¹⁰B₂O₃ MCP, the ¹⁰B₂O₃ MCP based on Atomic Layer Deposition(ALD) has the advantages of less neutron sensitive material consumption and high secondary electron emission coefficient on the inner wall of the channel. Firstly, the typical neutron and gamma signal of ^{nat}Gd-doped ¹⁰B₂O₃ MCP were studied experimentally. Geant4 simulation and theoretical calculation were performed to optimize the pore diameter, wall thickness, bias angle and coating thickness of the coated ¹⁰B₂O₃ MCP. It was shown that the thermal neutron detection efficiency was about 56% and the spatial resolution was about 22 μm when the coating thickness was 1 μm, the pore diameter was 10 μm, the wall thickness was 1 μm and the bias angle was 3°. The results are of great significance to the geometric parameter design of ¹⁰B₂O₃ MCP used as energy-resolved neutron imaging detectors at CSNS.

Key words: CSNS; ¹⁰B₂O₃ MCP; detection efficiency; spatial resolution; performance optimizations

Received date: 22 Aug. 2020; **Revised date:** 02 Oct. 2020

Foundation item: National Key R&D Program of China(2017YFA0403702); National Natural Science Foundation of China(U1832119, 11775243); Fundamental Scientific Research Business Expenses of Central Universities(3072020CFQ1501, 3072020-CFQ1502); Youth Innovation Promotion Association CAS

† Corresponding author: ZHOU Jianrong, zhoujr@ihep.ac.cn; SONG Yushou, sunzj@ihep.ac.cn; SUN Zhijia, songyushou80@163.com.