

文章编号: 1007-4627(2014)01-0069-06

涂硼 GEM 中子束流监测器物理过程的蒙特卡罗模拟

王拓^{1, 2}, 周健荣³, 孙志嘉^{3, 4}, 吴冲¹, 王艳凤^{3, 4}, 杨桂安^{3, 4}, 陈元柏^{3, 4}

- (1. 中国石油大学理学院, 北京 102249;
2. 中国疾病预防控制中心辐射安全所, 北京 100088;
3. 中国科学院高能物理研究所, 北京 100049;
4. 核探测与核电子学国家重点实验室, 北京 100049)

摘要: 基于硼转换的 GEM (Gas Electron Multiplier) 探测器性能突出, 计数率高达 10 MHz 以上, 耐辐射, 信号读出方式简单、灵活, 位置与时间分辨率高, 是下一代中子束流监测器极具优势的候选者。这种新型中子束流监测器主要由硼中子转换层、气体电离粒子放大的 GEM 以及二维读出电极组成。通过 Geant4 程序包对探测器物理过程进行蒙特卡罗 (Monte Carlo) 模拟, 主要研究了硼中子转换层转换效率与厚度及中子波长的关系、出射粒子的能谱、不同气体比不同气体厚度中的能量沉积、以及 γ 的能量沉积, 计算比较了不同厚度 GEM 膜对快中子产生的影响。模拟结果表明, 出射粒子在漂移区的能量沉积几乎与气体比无关, 硼层厚度取 0.1 μm 以下, 漂移区厚度 6 mm 时, 可以确保出射粒子在漂移区能量完全沉积, 同时具有最佳 n/γ 区分能力。

关键词: 中子束流监测器; GEM; 硼转换; Geant4

中图分类号: O572.21 **文献标志码:** A **DOI:** 10.11804/NuclPhysRev.31.01.069

1 引言

中子的发现与应用是 20 世纪的重要科技成就之一, 中子具有下列的优点: (1) 电中性、穿透力强; (2) 轻元素敏感、可进行同位素分析; (3) 具有磁矩、可进行磁性微观分析。这些优点使中子技术与 X 射线技术互补, 成为研究物质微观结构的重要手段。当前国际上的新一代散裂中子源, 如已建成的美国的 SNS, 日本的 J-PARC, 英国的 ISIS, 以及国内在建的中国散裂中子源 CSNS^[1] (China Spallation Neutron Source), 具有高脉冲通量、优越的脉冲时间结构、低本底、且不使用核燃料。CSNS 计划于 2018 年左右建成并运行, 届时将为国内外科学家提供世界一流的中子科学综合实验装置。

由于加速器功率不稳定、以及中子产生效率与中子束传输效率等诸多因素的影响, 经导管引出的中子

束是不稳定的, 束流强度随时间而改变, 从而影响实验测量结果, 解决的办法是在中子导管出口处、样品台之前放置一个中子束流监测器, 实时测量随时间变化的入射中子强度, 为谱仪探测器提供归一化的参数, 从而有效地减小因中子束入射强度变化而产生的影响。传统典型的中子束监测器大多使用透过式 ³He 正比计数器, 计数率最大 10 kHz, 中子注量率小于 10⁸ n/(cm²·s)。随着国际、国内大型中子源的发展, 中子通量越来越高, 对束流监测器也随之提出了更高的要求, 不仅需要实时地监测中子束的强度, 还需要具有良好的二维位置分辨能够实时地监测中子束斑的形状, 测量每一个像素上的中子通量, 并且提供很好的时间分辨, 以便使用 TOF (Time of Flight) 法进行中子波长的测量, 以满足高通量、高精度谱仪发展的要求。很明显目前传统的中子束流监测器已经不能满足新一代中子散射谱仪对束流监测

收稿日期: 2013-04-10; 修改日期: 2013-04-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11127508, 11175199)

作者简介: 王拓(1984-), 男, 黑龙江佳木斯人, 研究实习员, 从事物理学研究; E-mail: wangtuo@ihep.ac.cn

通信作者: 周健荣, E-mail: zhoujr@ihep.ac.cn.

提出的新要求^[2-3]。另外,当前还面临³He气体资源严重短缺的国际形势,价格十分昂贵。因此,研究新一代能替代³He的高计数率型中子探测技术就显得尤为迫切和重要。近年来蓬勃发展起来的GEM(Gas Electron Multiplier)气体探测器性能十分突出^[4],位置分辨好于100 μm,计数率高达1 MHz,耐辐射,应用范围广,使用不同转换材料就可以探测相应灵敏的粒子,涂硼作为转换层就可以探测中子。目前基于涂硼GEM的中子探测技术已成为新型中子探测器研究的热点,也是新一代中子束监测器的热点技术。

日本高能加速器研究组织(KEK)在2009年完成了涂硼GEM中子束监测器的研制工作^[5],并且在J-PARC上进行了束流测试得到了很好的结果,处于该领域国际领先水平。近年来国内一些单位也参与到GEM探测器的研究中,例如清华大学、中国科技大学、中国科学院近代物理研究所及中国科学院高能物理研究所都开展了相应的工作。2009年,CSNS中子探测器组就开始了涂硼GEM中子探测器系统化研究,以发展替代³He探测技术,该项工作已获得CSNS工程项目、核探测与核电子学国家重点实验室以及国家自然科学基金项目的支持。本文主要通过Geant4程序包模拟探测器物理过程,研究硼转换层对热中子的转换效率,对比硼转换层次级粒子出射能谱与在工作气体中沉积能谱,同时考虑n/γ区分能力,优化硼转换层厚度及漂移区气体厚度,最后还对计算了快中子在标准GEM膜和THGEM膜中产生

的影响,为探测器研制提供进一步的数据参考。

2 探测器结构与原理

中子束监测器位于主束上测量束流强度,因此必须具有很高的传输效率(>95%),以尽量减少对主束的影响,探测效率一般小于1%。对于基于硼转换的GEM中子束监测器而言,直接在漂移电极下表面涂一层硼作为中子转换层即可实现对中子的探测。探测器分为3个部分(结构如图1所示):中子转换、气体倍增和信号读出,3个过程彼此相互独立,工作气

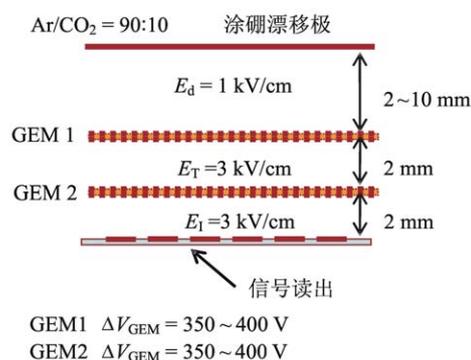
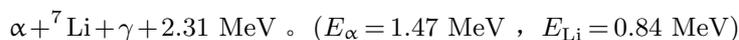
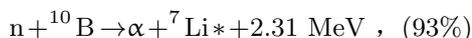


图 1 (在线彩图) 探测器结构

体采用常用的Ar和CO₂混合气体(90/10),一个大气压流气式供气,以保证探测器工作稳定,延长使用寿命。硼的同位素¹⁰B是常用的热中子敏感转换材料,化学活性低便于应用,含量丰富,且易获得浓缩硼(¹⁰B丰度99%),是理想的固体中子转换材料,中子与¹⁰B发生如下核反应:



该反应有2个反应道,其中93%分支比反应生成激发态⁷Li*,瞬间退激产生1.47 MeV α和0.84 MeV ⁷Li两种粒子,另7%分支比反应直接到基态产生1.78 MeV α和1.01 MeV ⁷Li。当入射中子被¹⁰B俘获后,产生⁷Li, α离子方向相反,二者其一直接损失在涂硼基材里,另一个进入工作气体,产生大量原初电子-电离对(~10⁴对),在漂移电场(~1 kV/cm)的驱动下,电子经过漂移区,由双层GEM进行气体放大(增益约几百),最后通过二维读出电路,获取中子的击中

位置与时间信息。

由于出射的带电粒子只有其中一个进入工作气体被探测到,其动能大,射程长且电离的面积也大,因此,电离粒子的质心本身与中子发生核反应的位置有一定的偏差,这个偏差决定了测量中子的位置精度会受硼层厚度、气体厚度、工作气压及工作电压的影响。对于时间的测量,由于采用的是固定转换层,厚度非常薄,中子被俘转换的时间晃动可以忽略不计,而GEM本身的时间分辨率高,故只要读出电子

学时间的精度足够高, 就可以实现高精度的 TOF 测量 ($< 1 \mu\text{s}$), 目前 ^3He 型气体探测器受限于探测器厚度, TOF 时间分辨率普遍较低 ($> 10 \mu\text{s}$)。

3 模拟结果

本文通过 Geant4 程序包对探测器物理过程进行蒙特卡罗模拟^[6], 主要研究硼中子转换层转换效率与厚度及中子波长的关系、出射粒子的能谱、不同气体比不同气体厚度中的能量沉积、以及 γ 的能量沉积, 计算比较不同厚度 GEM 膜快中子产生的影响。

3.1 硼转换层转换效率

由于中子转换出射的带电粒子 (α 或 ^7Li) 能量较大, 在气体中产生的原初电离也较大, 对 GEM 探测器来说, 探测效率接近 100%。因此, 硼层对中子的转换效率即可认为是探测器的探测效率。通过 Geant4 程序包模拟图 1 所示探测器结构, 中子相关物理过程采用 “QGSP_BIC_HP” 模型, 在紧邻硼漂移电极下方放置一个虚拟薄层用来记录出射的次级粒子的位置与能量。硼层 (^{10}B 丰度 99%) 对热中子 (波长 1.8 \AA , 下同) 转换效率如图 2(a) 所示, ^{10}B 厚度 $0.1 \mu\text{m}$ 厚,

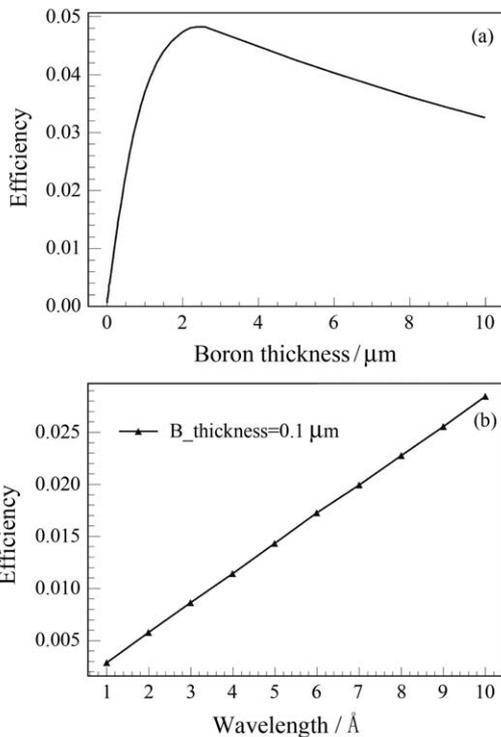


图 2 不同硼层厚度热中子转换效率 (a) 及 $0.1 \mu\text{m}$ 硼层对应不同波长中子转换效率 (b)

相应热中子转换效率约为 0.5%, 图 2(b) 为不同波长中子转换效率。

中子与 ^{10}B 发生核反应产生次级带电粒子 α 和 ^7Li , 2 个粒子的运动方向相反, 在硼层内与硼原子发生库仑相互作用, 并逐步损失能量, 二者在其中的射程均小于 $3 \mu\text{m}$, 因此硼的厚度大于 $3 \mu\text{m}$ 对提高中子转换效率是无意义的, ^{10}B 厚度 $2.5 \mu\text{m}$ 时取最大转换效率约 5%, 对于要求高传输效率的中子束流监测器来说, 中子探测效率低 ($< 1\%$), 故只需要在漂移电极下表面涂一层 ^{10}B 薄层。

由于库仑相互作用会造成出射粒子能量部分损失, 当硼层厚度增加时, 出射粒子的能量会向低能区扩散, 逐步在低能区积累, 形成低能区高的连续谱。通过 SRIM 计算出射离子在工作气体中的射程均小于 6 mm , 故设置漂移区厚度 10 mm , 保证出射粒子能量在气体中完全沉积。通过 Geant4 程序包计算比较不同硼层厚度出射粒子在漂移区的沉积能谱 (如图 3(a) 所示), 工作气体为 Ar/ CO_2 (90/10), 对于 1, 2, 3 μm 硼层厚度, 沉积能谱变成连续谱, 而对于 $0.1 \mu\text{m}$ 厚, 能谱有 2 个清晰、分立的峰, 分别对应能量为

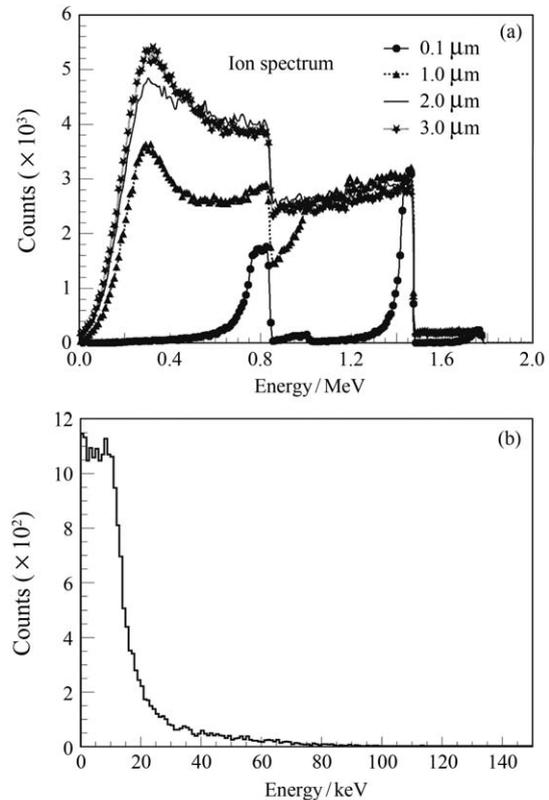


图 3 不同硼层厚度出射粒子在工作气体中的沉积能谱 (a) 及 1 MeV γ 射线在工作气体中的沉积能谱 (b)

1.47 MeV α 和 0.84 MeV ${}^7\text{Li}$, 硼层中能损几乎可以忽略。图 3(b) 为 1 MeV γ 射线在相同厚度漂移区内沉积的能谱, 由图可以看出 γ 射线在其中沉积的能量小于 80 keV。对于厚度小于 0.1 μm 的硼层, 出射粒子能量几乎无歧离, 与 γ 射线沉积的能量之间存在一个很宽 (~ 600 keV) 的空带, 即 γ 产生的信号里不会混有中子小信号, 如果将阈值放在该区间上, 即可方便有效地区分中子信号, 获得探测器最好的 n/ γ 分辨能力, 因此, 对于涂硼 GEM 中子束监测器而言, ${}^{10}\text{B}$ 厚度取小于 0.1 μm , 即转换效率小于 0.5%, 选取更薄的厚度, 可以降低探测器的灵敏度, 从而可以使监测器用于更高中子束通量的测量, 可根据具体应用最终确定硼层的厚度, 对于 CSNS 而言, ${}^{10}\text{B}$ 厚度 0.1 μm , 转换效率 0.5% 可以满足应用要求^[7]。

3.2 漂移区厚度对能量沉积的影响

为了比较不同气体厚度出射粒子的能量沉积, 通过 Geant4 计算, 硼层厚度取 0.1 μm , 工作气体为 Ar/ CO_2 (90/10), 漂移区厚度从 1 mm 到 10 mm, 共 10 个厚度出射粒子在其中的沉积能谱, 图 4 对应漂移区厚度 2, 4, 6 mm 沉积能谱, 及硼层表面直接出射粒子的能谱, 由图比较可以看出, 随着厚度增加, 沉积能谱越接近粒子出射能谱, 6 mm 时二者几乎完全一致, 厚度再增加能谱不再变化, 说明 6 mm 气体厚度已经足够使出射粒子能量完全在其中沉积, 即出射粒子射程小于 6 mm, 这与 SRIM 软件计算的射程结果一致。漂移区选择 6 mm 的工作气体厚度让带电粒子能量完全沉积, 这样可以使探测器输出较大的原始信号, 有助于探测器本身提高区分 γ 等其他干扰小信号的能力。

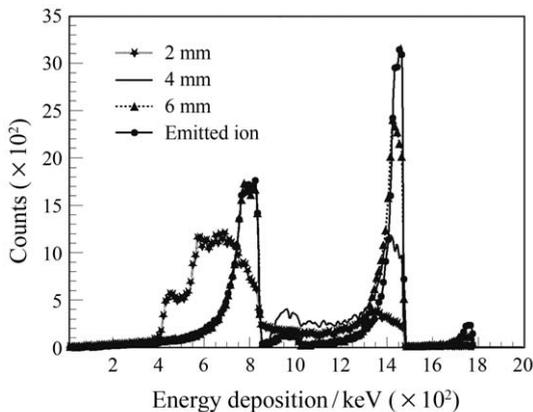


图 4 不同漂移区厚度能量沉积与出射粒子能谱

3.3 不同比工作气体对能量沉积的影响

硼层厚度取 0.1 μm , 漂移区厚度设为 6 mm, 通过 Geant4 计算 Ar 和 CO_2 ^[8] 3 种不同比分 (90/10, 80/20, 70/30) 工作气体内出射粒子沉积的能谱, 如图 5 所示, 由于工作气体中的 Ar 和 CO_2 分子量相差很小, 气体比分不同对能损影响很小, 因此, 3 种不同气体比内出射粒子能谱几乎没有差别。考虑到高压电源, 最终实验倾向采用 Ar/ CO_2 (90/10) 作为工作气体, 可以在较低的工作电压下获得足够的探测器增益, 从而减少高压太高引入的实际问题。

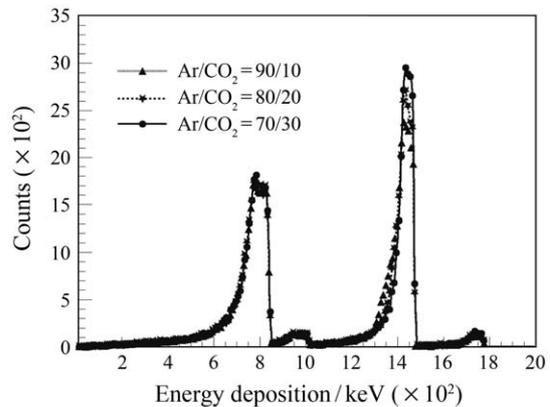


图 5 不同气体比能量沉积谱

3.4 快中子产生的影响

欧洲核子中心 (CERN) 开发的 GEM 膜, 分为标准 GEM 膜和 THGEM 膜, 厚度从几十微米到几百微米, 中间的绝缘层一般为聚酰亚胺材料 (如 Kapton), 由 C, H, O, N 4 种元素构成, 其中含有大量的 H 原子。中子束监测器作为中子导管出口处的第一个探测器, 由于准直和慢化得不充分, 中子束线总会伴随部分能量较高的快中子, 这些快中子会与氢原子核发生弹性散射, 生成一定量反冲质子, 进入探测器漂移区被探测到, 从而产生干扰信号。因此, 有必要通过模拟计算, 估算快中子的影响效果, 从而选择合适的 GEM 膜。

利用 Geant4 程序包模拟单层 GEM 膜, 其中绝缘层为 Kapton, 厚度在 1 ~ 100 μm 之间变化, 入射快中子能量选择 1 和 2 MeV, 直接计算单位入射快中子产生的反冲质子数目, 即反冲质子转换效率, 如图 6 所示, 对于 1 MeV 中子, Kapton 厚度为 20 μm 时, 反冲质子效率趋于饱和, 约为 0.01%。对于 2 MeV 中子, Kapton 厚度为 50 μm 时, 反冲质

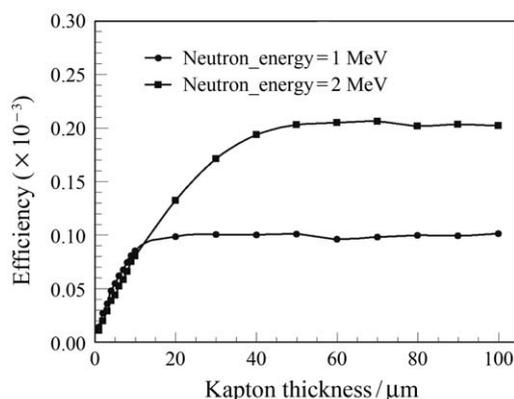


图 6 反冲质子转换效率随 Kapton 厚度的关系

子效率趋于饱和, 约为 0.02%。随着 Kapton 厚度的增加, 反冲质子数目也增加, 但由于反冲质子在 Kapton 中的射程有限, 随着厚度继续增加, 部分反冲质子已经不能穿透 Kapton, 转换效率从而最终趋于饱和, 中子能量大, 产生的反冲质子能量也大, 在 Kapton 中的射程也越大, 从而转换效率也越大。

为了比较不同能量的快中子在标准 GEM 膜和 THGEM 膜上产生的反冲质子转换效率, 通过 Geant4 程序包计算, 入射中子能量范围取 1 ~ 10 MeV, Kapton 厚度取 50 和 500 μm , 分别对应标准 GEM 膜 Kapton 厚度和一种典型 THGEM 膜 Kapton 厚度。反冲质子转换效率由三方面因素决定: 一是在一定范围内中子能量越高, 反应截面越小, 从而降低反冲质子产生效率; 二是一定能量的反冲质子在 Kapton 中具有射程, 越厚的部分反冲质子不能穿透 Kapton; 三是中子能量越高, 产生的反冲质子能量越大, 穿透 Kapton 厚度也越厚, 从而提高反冲质子的产生效率。如图 7 所示, 对于 50 μm 厚度 Kapton, 反冲质子转换效率在 3 MeV 之前随中

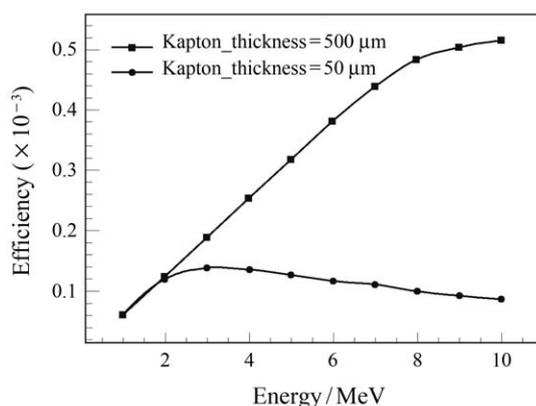


图 7 反冲质子转换效率随入射中子能量的关系

子能量增加而增加, 此时由因素三起主导作用, 当中子能量为 3 MeV 时, 三种因素达平衡, 转换效率最大, 之后中子能量越大, 因素一起主导作用, 故随能量增高反冲质子转换效率降低。同理可分析, 对于 500 μm 厚度 Kapton, 由于厚度更厚, 因素三起主导作用, 对应能量范围大。因此三项因素综合作用的最大转换效率所对应的能量较 50 μm 时要大, 在 10 MeV 以上。

4 结论

本文通过 Geant4 程序包对探测器物理过程进行蒙特卡罗模拟, 主要研究了硼中子转换层转换效率与厚度及中子波长的关系、出射粒子的能谱、不同气体比不同气体厚度中的能量沉积、以及 γ 的能量沉积。计算比较了不同厚度 GEM 膜快中子产生的影响, 模拟结果表明, 出射粒子在漂移区的能量沉积几乎与气体比无关, 硼层厚度取 0.1 μm 以下, 漂移区厚度 6 mm 时, 可以确保出射粒子在漂移区能量完全沉积, 同时具有最佳 n/γ 区分能力, 为了尽可能减少快中子引入的干扰信号, 最好选择厚度最薄的标准 GEM, 产生的反冲质子转换效率小于 0.03%。

致谢 感谢 CSNS 工程、核探测与核电子学国家重点实验室的支持。

参考文献:

- [1] WEI Jie. Modern Physics, 2007, **19**: 23. (in Chinese)
(韦杰. 现代物理知识, 2007, **19**: 23.)
- [2] EIJK C. Nucl Instr and Meth A, 2002, **477**: 383.
- [3] GEBAUER B. Nucl Instr and Meth A, 2004, **535**: 65.
- [4] SAULI F. Nucl Instr and Meth A, 1997, **386**: 531.
- [5] OHSHITA H, UNO S, OTOMO T, *et al.* Nucl Instr and Meth A, 2010, **623**: 126.
- [6] WU Chong, ZHANG Qiang, SUN Zhijia, *et al.* Nucl Phys Rev, 2012, **29**: 173. (in Chinese)
(吴冲, 张强, 孙志嘉, 等. 原子核物理评论, 2012, **29**: 173.)
- [7] ZHOU Jianrong, SUN Zhijia, LIU Ben, *et al.* Chinese Physics C, 2011, **35**: 668.
- [8] WANG Yanfeng. Simulation Study of a Neutron Beam Monitor Based on Boron-coated GEM[D]. Wuhan: Central China Normal University, 2011: 31. (in Chinese)
(王艳凤. 涂硼 GEM 中子束监测器的模拟研究[D]. 武汉: 华中师范大学, 2011: 31.)

Monte Carlo Simulation Study on the Physical Process of the Boron-coated GEM Neutron Beam Monitor

WANG Tuo^{1,2}, ZHOU Jianrong³, SUN Zhijia^{3,4}, WU Chong¹, WANG Yanfeng^{3,4},
YANG Gui'an^{3,4}, CHEN Yuanbo^{3,4}

(1. College of Science, China University of Petroleum, Beijing 102249, China;

2. National Institute for Radiological Protection, Chinese Center for Disease Control and Prevention,
Beijing 100088, China;

3. Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

4. State Key Laboratory of Particle Detection and Electronics, Beijing 100049, China)

Abstract: The performance of a boron-coated GEM (Gas Electron Multiplier) neutron beam monitor is outstanding, with the counting rate up to 10 MHz, radiation resistance, flexible readout patterns, high resolution in position and time, which is considered as a good candidate for the next generation of neutron beam monitor. This new kind of neutron beam monitor mainly consists of boron convertor, GEM and two-dimensional readout electrode. In this paper, the Monte Carlo simulation on the physical process of the detector has been carried out by using Geant4 package, including the conversion efficiency of the boron layer influenced by the thickness and the neutron wavelength, the spectrum of emitted ions, and the energy deposition of the ions and the gamma in the different gas thickness of several gas volume ratio. Besides, the effect by the fast neutrons with GEM foils has also been calculated. The results show that the ions energy deposited in the drift region is almost independent of the gas volume ratio, the thickness 6 mm of the drift region is adequate for the full energy deposition and the boron thickness smaller than 0.1 μm is the best choice for n/ γ separation. This work would be helpful for the detector design and provide an optimized option for the development of the boron-coated GEM neutron beam monitor.

Key words: neutron beam monitor; GEM; boron convertor; Geant4

Received date: 10 Apr. 2013; **Revised date:** 28 Apr. 2013

Foundation item: National Natural Science Foundation of China(11127508, 11175199)

Corresponding author: ZHOU Jianrong, E-mail: zhoujr@ihep.ac.cn.

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