

聚变中子能谱测量系统脉冲中子灵敏度的实验研究*

祁建敏[†] 周林 蒋世伦 张建华

(中国工程物理研究院核物理与化学研究所, 绵阳 621900)

(2013年1月13日收到; 2013年9月10日收到修改稿)

为多种复杂环境下的稳态和脉冲 DT 聚变中子能谱测量建立了一种灵敏度优化反冲质子磁谱仪. 使用成像板和同位素 α 源测量了谱仪的反冲质子能量 - 位置投影关系. 利用稳态加速器中子源平台、通过单粒子计数方法结合三维带电粒子输运程序模拟, 研究了谱仪脉冲中子灵敏度能量响应. 通过高探测效率参数设置使谱仪对 DT 中子的探测效率达到 $2 \times 10^{-5} \text{ cm}^2$ 水平, 从而在较弱中子源上获得了较高统计精度实验数据. 程序模拟结果与谱仪 α 粒子刻度和 DT 中子标定实验结果取得了良好的一致性, 可由此发展精细解谱技术, 以提高脉冲中子能谱测量的灵敏度和能量分辨.

关键词: 聚变中子能谱, 磁反冲质子, 脉冲中子灵敏度, 粒子输运

PACS: 52.70.Nc, 29.30.Hs

DOI: 10.7498/aps.62.245203

1 引言

聚变反应产生的中子携带等离子体中心区域的重要信息, 如离子温度、燃料密度和聚变功率等^[1,2], 测量由于离子热运动而产生的聚变中子能谱多普勒展宽 (Doppler broadening) 可以确定等离子体中心区离子温度^[3]. 惯性约束聚变 (ICF) 实验中, 由初级 DT 中子能谱的多普勒展宽可以确定相应的离子温度和初级中子产额, 由初级中子产额和相应的散射 (down-scattered) 中子产额可以精确测量靶丸燃料面密度^[4]. 对于脉冲中子能谱, 通常用于稳态 (或准稳态) 中子能谱的单粒子计数、脉冲幅度分析和符合测量等方法不再适用, 需要采用特殊的测量手段如飞行时间法和反冲质子磁分析法.

反冲质子磁谱仪 (magnetic proton recoil, MPR) 是测量高功率聚变装置中子能谱的一种新型高性能诊断仪器, 通过反冲质子磁分析技术将中子能量信息转化为反冲质子的空间分布信息^[5,6]. 欧洲联合环 (JET) 建造的 MPR 谱仪^[7] 和美国 OMEGA, NIF 装置建造的磁反冲谱仪^[8] 已经开展了大量实验工作, 并取得了较好的实

验结果. 中国工程物理研究院 (CAEP) 研制了一种用于多种复杂环境稳态和脉冲 DT 聚变中子能谱测量的紧凑型 MPR 谱仪原型 (cMPR)^[9]. 该谱仪采用 45° 反冲角、小体积永磁分析磁场、短束流传输线和稳态/脉冲两用探测器阵列, 对 DT 中子的能量分辨率在 3%—7% 之间, 探测效率在 10^{-8} 量级, 脉冲测量灵敏度在 $10^{-20} \text{ C}\cdot\text{cm}^2$ 量级^[10,11]. 当前脉冲中子能谱测量需要对该谱仪原型进行改进, 以提高 7—16 MeV 区间的脉冲中子灵敏度. 为此采用 30° 反冲角、大面积反冲靶、较大气隙分析磁铁和大面积 PIN 探测器等改进方式, 希望将谱仪对 DT 中子的探测效率提高到 10^{-6} 水平、脉冲测量灵敏度提高到 $10^{-18} \text{ C}\cdot\text{cm}^2$ 量级.

反冲质子磁谱仪脉冲中子灵敏度 (单位 $\text{C}\cdot\text{cm}^2$) 表征对于单位通量密度 (单位 n/cm^2) 的入射中子, 谱仪探测器的输出电荷量 (单位 C), 其能量响应主要通过理论计算和实验标定获得^[12,13]. 实验标定直接给出某一给定能量中子的脉冲测量灵敏度, 同时验证灵敏度的理论计算结果. 实验所需单能脉冲中子源应使测量点处中子通量大于 $10^{15} \text{ cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, 而现有“束-靶”加速器脉冲中子源强度难以达到

* 国家自然科学基金青年科学基金 (批准号: 11005095) 和中国工程物理研究院科学技术发展基金 (批准号: 2011B0103017) 资助的课题.

[†] 通讯作者. E-mail: qjm06@sina.com

要求. 因此考虑在稳态加速器中子源上通过单粒子计数法测量时间积分焦平面反冲质子多道能谱, 结合谱仪三维带电粒子输运程序^[10]模拟, 最终确定能量分辨率、探测效率和脉冲测量灵敏度等关键参数.

2 灵敏度优化反冲质子磁谱仪 (MPROS)

MPR 探测效率和灵敏度性能主要由 n-p 反冲角、反冲靶厚度和面积、分析磁场入射立体角、焦平面探测器接收面积等因素决定. 为实现谱仪的灵敏度优化, 从 n-p 反冲角 (θ_{np})、反冲靶、分析磁

铁和焦平面探测器等方面对谱仪进行了改进, 如图 1 所示.

将 MPR 的 n-p 反冲角由 cMPR 谱仪的 45° 减小为 30° , 使 14 MeV 中子对应的反冲质子平均能量 (正比于 $\cos^2 \theta_{np}$) 由 7 MeV 提高到 10.5 MeV, n-p 散射微分截面 (正比于 $\cos \theta_{np}$) 提高 22.5%, 进而提高了入射反冲质子的通量.

增大 $(\text{CH}_2)_n$ 反冲靶厚度和面积可提高反冲质子产额, 但也使反冲质子在反冲靶中的电离损失增大, 导致焦平面反冲质子束斑变大、谱仪能量分辨率降低. 由探测效率和能量分辨的折中考虑, MPROS 选择面积约 10 cm^2 , 厚约 12 mg/cm^2 的 $(\text{CH}_2)_n$ 靶.

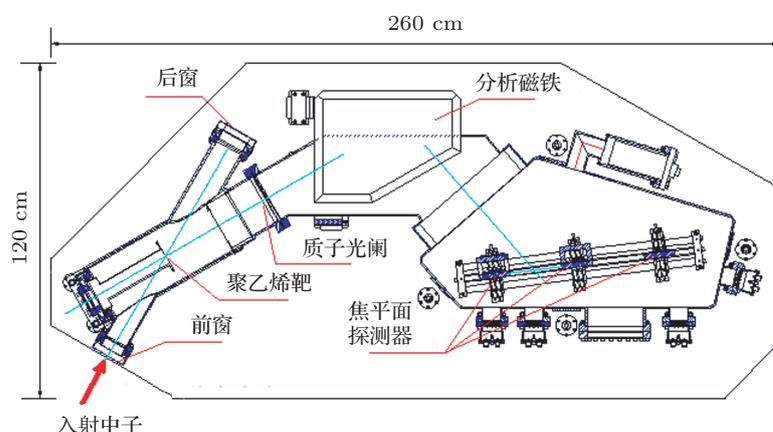


图 1 MPROS 系统结构图

MPROS 将分析磁铁气隙入射横截面增至 240 mm 长, 60 mm 高, 可使质子光阑最大面积达到 20 cm^2 水平, 相应的最大入射立体角增至 12 msr . 磁分析系统的优化设计使大立体角入射反冲质子束仍能良好地聚焦在焦平面上, 从而保证了 MPR 的能量分辨.

MPR 对反冲质子的水平聚焦和纵向发散特性使焦平面反冲质子束斑通常呈长方形, 因此 MPROS 在同一能量段使用上下对称放置的两个正方形 PIN 探测器, 以尽可能提高反冲质子收集效率、提高谱仪的探测灵敏度.

3 MPROS 中子灵敏度的实验研究

MPROS 对脉冲中子灵敏度的能量响应主要通过程序模拟和实验标定相结合方法确定. 自行开发的三维带电粒子输运程序基于谱仪系统的精细建模, 以实测分析磁铁三维磁场强度分布为基础, 从带电粒子在磁场中运动的基本规律出发, 包括反冲靶 n-p 反应抽样、质子光阑抽样、带电粒子输运和

焦平面探测器收集等过程. 其中带电粒子输运过程模拟结果由谱仪 α 粒子刻度实验验证, 探测效率/灵敏度计算结果由 DT 中子标定实验验证, 对脉冲中子灵敏度的能量响应由理论计算和实验测量结果综合确定.

3.1 分析磁铁三维磁场强度分布的测量

MPR 的分析磁铁采用高性能烧结钕铁硼材料, 尺寸为 52.0 cm 长, 44.0 cm 宽, 50.0 cm 高, 气隙高度 60 mm, 入射横截面宽 240 mm. 测量网格尺寸为 $5 \text{ mm} \times 5 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$, 位置座标定位精度为 $\pm 0.2 \text{ mm}$. 图 2 显示实测中心平面的磁场强度分布, 中心场强 7300 Gs ($1 \text{ Gs} = 10^{-4} \text{ T}$), 与理论计算值 7370 Gs 基本相符. 磁极物理边界与 6000 Gs 等高线重合, $X = -50 \text{ mm}$, $Y = -75 \text{ mm}$ 附近局部场强由 7200 Gs 降至 7000 Gs. 该磁场缺陷对粒子输运的影响表现为小部分粒子偏转半径略有增大, 使得粒子焦斑出现“拖尾”现象.

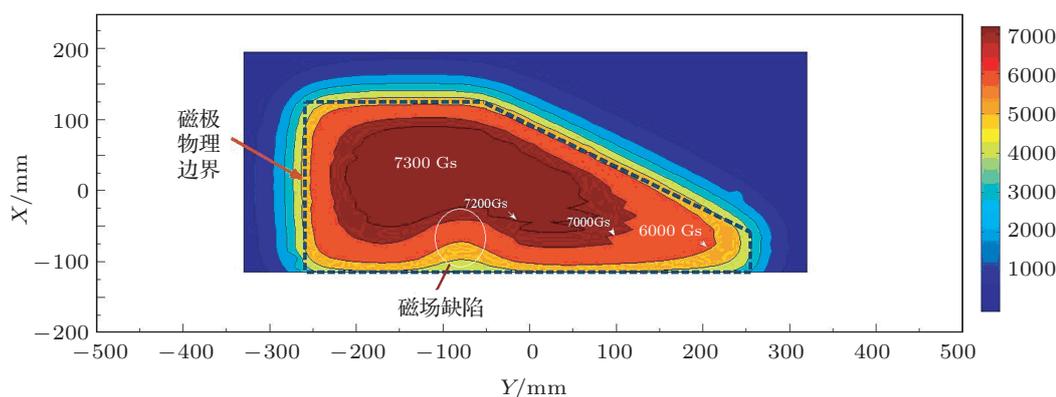


图2 分析磁铁中心平面实测磁场强度分布

3.2 反冲质子能量 - 位置投影关系的实验研究

利用不同能量的 α 粒子研究反冲质子偏转聚焦特性, 以刻度谱仪校验计算程序. 图 3 为 MPROS 对 ^{226}Ra 源发射的 4.78, 5.30, 5.49, 6.00 和 7.69 MeV α 粒子的偏转聚焦实验结果. 实验中将 ^{226}Ra 源放置在反冲靶位置, 焦平面上使用两块长 20 cm, 宽 11 cm 的 BAS-TR 成像板 (Fujifilm Co. Ltd.) 测量 α 粒子空间分布, 由图 3 可见因磁场缺陷导致的粒

子焦斑“拖尾”现象. 通过三维带电粒子输运程序模拟不同能量 α 粒子通过分析磁场后在焦平面上形成的空间分布, 并与实测成像板 (IP) 空间分布比较, 各能点分布中心的实测值与计算值偏离小于 2 mm, 空间分布峰值及半高宽的差别均小于 5% (主要由分析磁铁理论和实际边缘场分布的偏差引起), 程序模拟与实验测量结果一致. 对五种能量 α 粒子实测焦点位置进行拟合 (图 4), 得到 MPROS 反冲质子能量 - 位置投影关系 $dX'/dE_p = 8.865 \text{ cm/MeV}$, 由此可确定各测量能点焦平面探测器的布放位置.

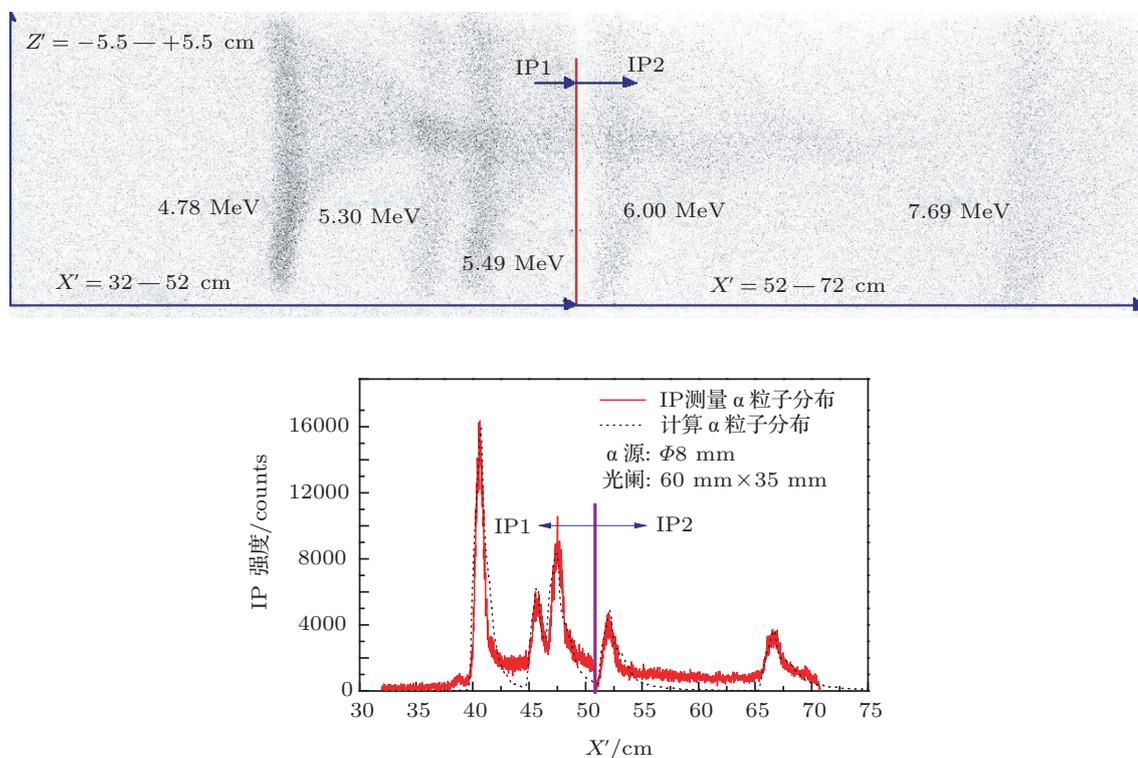


图3 MPROS ^{226}Ra 源 α 粒子标定实验结果

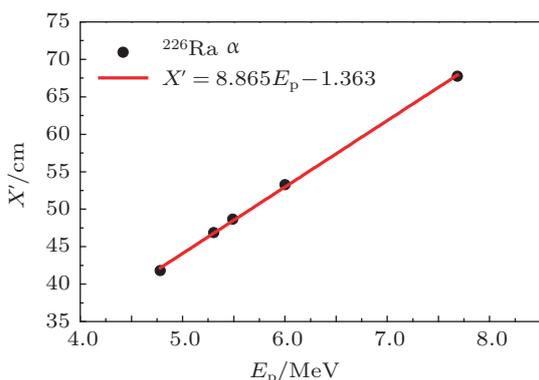


图4 MPROS 实测反冲质子能量 - 位置投影关系

3.3 MPROS 中子灵敏度的实验研究

MPROS 对脉冲中子灵敏度的实验研究在核物理与化学研究所的 K-400 加速器 DT 中子源平台上进行. 该中子源直径约 20 mm, 可在 4π 立体角内近似均匀地产生强度为 $3 \times 10^{10} \text{ s}^{-1}$ 的稳态 (直流) DT 中子. 实验中, MPROS 使用的聚乙烯 n-p 靶宽 5.0 cm, 高 4.5 cm, 距 DT 中子源约 35 cm. 当采用宽 6.0 cm, 高 3.5 cm 的质子光阑时, n-p 反冲角 $\theta_{np} = 30^\circ \pm 4^\circ$, 理论计算得到入射反冲质子的平均能量为 10.1 MeV.

在面向中子源方向采用 10 cm 厚铅和 40 cm 含硼聚乙烯复合屏蔽以提高实验测量的信噪比. 利用计算机多道分析器记录 PIN 探测器输出的反冲质子能谱和计数率, 以此校验理论计算程序. 实验采用表 1 所示参数, 同时使用两个灵敏区面积 $50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$, 厚 $400 \mu\text{m} \pm 10 \mu\text{m}$ 的正方形 PIN 探测器, 沿反冲质子入射方向前后串列布放 (间距 5 cm). 前探测器中心位置由图 4 反冲质子能量 - 位置投影关系确定, 表面与 10.1 MeV 质子出射方向垂直. 后探测器位于前探测器背面, 视野被前探测器遮挡,

难以测到反冲质子信号. 这样, 前探测器 (CH1 道) 记录总的信号加本底谱, 后探测器 (CH2 道) 只记录本底谱, 如图 5(a) 所示. CH1 多道谱减去 CH2 多道谱可得到 PIN 探测器中反冲质子的沉积能量谱, 如图 5(b) 所示. 理论计算的多道谱和实验测量 PIN 探测器中反冲质子能量沉积多道谱基本重合, 峰位分别为 3.66 MeV 和 3.86 MeV, 峰面积相差 3%, 表明 MPR 谱仪三维带电粒子输运程序具有较高的精度.

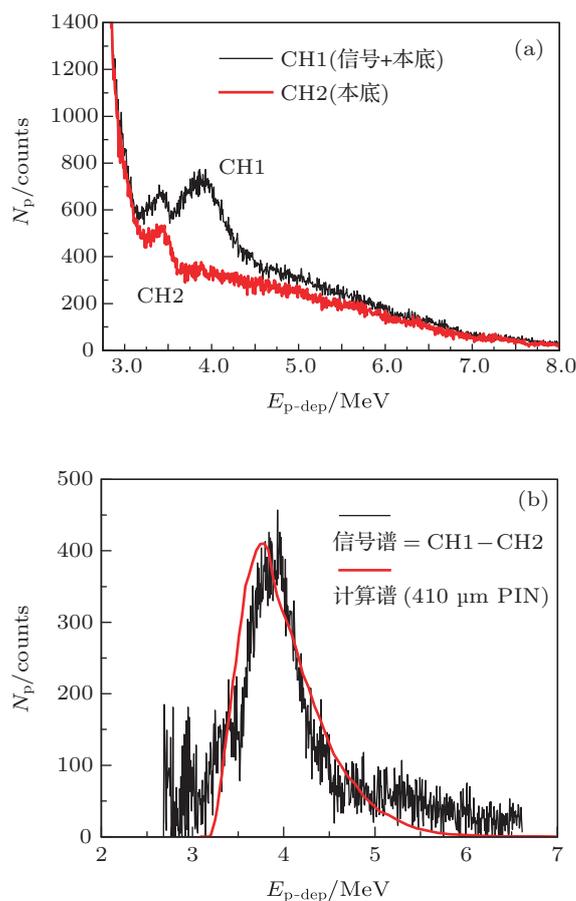


图5 MPROS DT 中子标定实验测量及理论计算 PIN 多道谱

表 1 MPROS DT 中子灵敏度标定实验基本参数及主要结果

数据 来源	测点积分 通量/n·cm ⁻²	n-p 靶厚 度/mg·cm ⁻²	n-p 靶 面积/cm ²	光阑 面积/cm ²	光阑 - 靶 距离/cm	反冲 角/(°)	入射质子 平均能量/MeV	PIN 平均沉积 能量/MeV	PIN 质子 计数/counts	探测 效率	脉冲灵敏 度/C·cm ²
理论	2.48×10^9	28.0	22.5	21.0	42.0	30 ± 4	10.1	3.66	6.64×10^4	2.7×10^{-5}	4.37×10^{-18}
实验	2.48×10^9	28.0	22.5	21.0	42.0	30 ± 4	—	3.86	6.43×10^4	2.6×10^{-5}	4.44×10^{-18}

根据表 1 谱仪厚反冲靶、大质子光阑和 $50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ PIN 探测器参数 (高探测效率设置), 计算的脉冲中子灵敏度能量响应如图 6 示, 谱仪 7—16 MeV 区间的脉冲中子灵敏度在 $(2\text{—}8) \times 10^{-18} \text{ C}\cdot\text{cm}^2$ 水平, 对应的能量分辨率在 15%—

30%之间. 由于厚反冲靶使单能中子产生的反冲质子产生较大的能量展宽, 因此降低反冲靶厚度至 12 mg/cm^2 水平并对实验数据进行解谱计算, 可使 MPROS DT 中子能量分辨率提高到 5%水平, 同时保持 10^{-6} cm^2 以上的探测效率和接近 $10^{-18} \text{ C}\cdot\text{cm}^2$

量级的脉冲测量灵敏度.

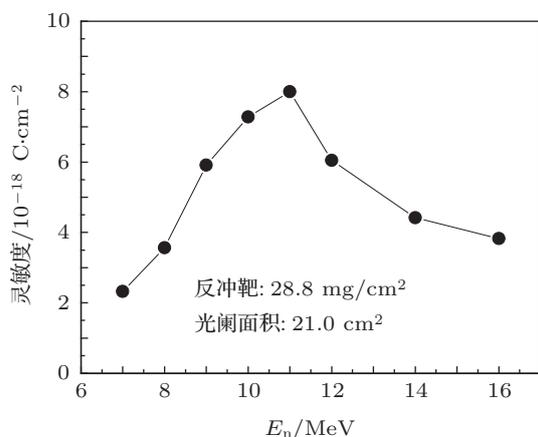


图6 MPROS 高探测效率参数设置条件下脉冲中子灵敏度的能量响应计算结果

4 结论

灵敏度优化反冲质子磁谱仪脉冲中子灵敏度

的能量响应同时依赖理论计算和实验标定. 三维带电粒子输运程序基于实际谱仪的精确建模和实测分析磁场数据, 其模拟结果与谱仪 α 粒子刻度实验及 DT 中子标定实验结果具有较好的一致性, 由此可得到 MPROS 对 7—16 MeV 能区脉冲中子灵敏度能量响应较为准确的数据.

MPROS 对脉冲中子的灵敏度可利用稳态单能中子源通过单粒子计数方法标定. 在中子源较弱时可采用大面积厚反冲靶 ($20\text{--}30 \text{ mg/cm}^2$) 和面积质子光阑 ($\sim 20 \text{ cm}^2$) 等方法将谱仪探测效率提高至 10^{-5} cm^2 量级, 从而提高实验测量数据的统计精度和信噪比. 未来将细致分析实测探测器多道谱和三维带电粒子输运程序模拟多道谱, 利用经过实验校正的程序模拟结果发展谱仪质子焦平面空间分布解谱技术, 使谱仪在高探测效率参数设置时仍能获得较高的能量分辨, 并降低厚转换靶带来的质子能量分散、大入射立体角带来的质子焦斑展宽、分析磁场不均匀等因素对分辨率的影响.

- [1] Pereira C R, Combo N, Cruz N, Sousa J, Correia C, Varandas C, Conroy S, Källne J 2006 *Fusion Engineering and Design* **81** 1873
- [2] Sasao M, Krasilnikov V A, Nishitani T, Batistoni P, Zaveriaev V, Kaschuck A Yu, Popovichev S, Iguchi T, Jarvis N O, Källne J, Fiore L C, Roquemore L, Heidbrink W W, Donne H J A, Costley E A, Walker C 2004 *Plasma Phys. Control. Fusion* **46** S108
- [3] Hicks G D, Li K C, Petrasso D R, Séguin H F, Burke E B, Knauer P J, Cremer S, Kremens L R, Cable D M, Phillips W T 1997 *Rev. Sci. Instrum.* **68** 589
- [4] Houry M, Delagnes E, Riz D, Canaud B, Disdier L, Garaude F, Giomataris Y, Glebov Yu V, Legou P, Rebourgeard P, Sangster C 2006 *Nucl. Instrum. Meth. A* **557** 648
- [5] Källne J, Ballabio L, Frenje J, Conroy S, Ericsson G, Tardocchi M, Traneus E, Gorini G 2000 *Phys. Rev. Lett.* **85** 1246
- [6] Tardocchi M, Ballabio L, Conroy S, Ericsson G, Frenje J, Gorini G, Guadagn C, Källne J, Prandoni P, Traneus E 1999 *Rev. Sci. Instrum.* **70** 1171
- [7] Frenje J, Ballabio L, Conroy S, Ericsson G, Gorini G, Källne J, Prandoni P, Tardocchi M, Traneus E 1999 *Rev. Sci. Instrum.* **70** 1176
- [8] Glebov Yu V, Meyerhofer D D, Sangster C T, Stoeckl C, Roberts S, Barrera A C, Celeste R J, Cerjan J C, Dauffy S L, Eder C D, Griffith L R, Haan W S, Hammel A B, Hatchett P S, Izumi N, Caldwell E S 2006 *Rev. Sci. Instrum.* **77** 10E715
- [9] Qi J M, Jiang S L, Zhou L, Peng T P 2011 *Atom. Energy Sci. Technol.* **45** 880 (in Chinese) [祁建敏, 蒋世伦, 周林, 彭太平 2011 原子能科学技术 **45** 880]
- [10] Qi J M, Zhou L, Jiang S L, Peng T P 2011 *Chin. Phys. C* **35** 374
- [11] Zhou L, Jiang S L, Qi J M, Wang L Z 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 072902 (in Chinese) [周林, 蒋世伦, 祁建敏, 王立宗 2012 物理学报 **61** 072902]
- [12] Yang J L, Yang H Q, Tang Z Y 2007 *Nucl. Electron. Detect. Technol.* **27** 911 (in Chinese) [杨建伦, 杨洪琼, 唐正元 2007 核电子学与探测技术 **27** 911]
- [13] Cheng J X, Ouyang X P, Zheng Y, Zhang A H, Ouyang M J 2008 *Chin. Phys. B* **17** 2881

Experimental studies on pulsed neutron sensitivity of a fusion neutron spectrometer*

Qi Jian-Min[†] Zhou Lin Jiang Shi-Lun Zhang Jian-Hua

(*Institute of Nuclear Physics and Chemistry, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China*)

(Received 13 January 2013; revised manuscript received 10 September 2013)

Abstract

A sensitivity optimized magnetic proton recoil (MPROS) spectrometer for measuring both steady and pulsed fusion neutron spectra in several complicated environments is developed. The proton energy-position projection relationship of the spectrometer is measured by utilizing an imaging plate. The energy response to neutron sensitivity of the MPROS spectrometer is studied through a single event count method on an accelerated steady DT neutron source and simulations by a three-dimensional charged particle transport code. The detection efficiency of the spectrometer to DT neutrons reaches a level of $2 \times 10^{-5} \text{ cm}^2$ through high efficiency parameter settings, therefore the experimental data of high statistic accuracy are obtained on a comparatively weak neutron source. Results from simulations and experiments, such as α particle calibrations, and DT neutron calibrations, achieve good consistency. Based on this conclusion, precise solution technique of measured spectra can be developed to increase the sensitivity and energy resolution of measurements of pulsed neutron spectroscopy.

Keywords: fusion neutron spectrum, magnetic proton recoil, pulsed neutron sensitivity, particle transport

PACS: 52.70.Nc, 29.30.Hs

DOI: 10.7498/aps.62.245203

* Project supported by the Young Scientists Fund of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 11005095) and the Science and Technology Development Foundation of China Academy of Engineering Physics (Grant No. 2011B0103017).

[†] Corresponding author. E-mail: qjm06@sina.com