

一种基于成像板的能量卡阈式快中子 图像测量方法*

章法强[†] 祁建敏 张建华 李林波 陈定阳
谢红卫 杨建伦 陈进川

(中国工程物理研究院核物理与化学研究所, 绵阳 621900)

(2014年3月3日收到; 2014年3月17日收到修改稿)

为减小散射中子等较低能量的中子对快中子图像的贡献, 提出了在成像板前依次紧贴金属卡阈片和富氢元素薄片的能量卡阈式快中子成像方法. 该方法通过改变卡阈片材料、厚度等参数, 可有效降低成像结构对某一能段中子的相对灵敏度. 以14 MeV中子照相为例设计的能量卡阈式成像结构为TR成像板依次覆盖约150 μm Pb膜和500 μm 聚乙烯膜, 计算表明该结构对8 MeV以下快中子灵敏度小于其对14 MeV中子灵敏度的30%. 利用K400加速器DT中子源开展了验证实验, 结果表明能量卡阈式快中子成像结构能够有效消除样品散射中子引起的边界增强效应.

关键词: 快中子照相, 蒙特卡罗模拟, 能量卡阈, 成像板

PACS: 87.57.Va, 87.57.C-, 87.15.ak, 52.70.-m

DOI: 10.7498/aps.63.128701

1 引言

快中子成像技术在聚变区中子图像诊断^[1-3]、库存核武器检查^[4,5]和反恐安检^[6]等应用领域受到了广泛重视. 然而, 在实际应用中, 快中子图像往往受到除信号源中子以外各种辐射的干扰, 严重降低图像质量. 例如, 在聚变区中子图像诊断中, 伴随聚变中子信号的辐射本底有伽马、散射中子等. 在基于快中子照相的无损检测中, 环境散射中子、样品散射中子和厚闪烁体内对中子的二次及多次探测都会干扰包含着物体内部结构信息的直穿中子信号^[7-10]. 在上述情况中, 大多数快中子辐射转换体不仅对伽马射线有一定响应输出, 而且对中子能量不加区分. 更重要的是, 伽马射线和散射中子等本底辐射与信号源中子的空间分布相互耦合, 对快中子图像的对比度和分辨率均造成一定影响.

基于快中子与铜等材料的活化反应存在能量阈值, Mikerov等^[11]曾利用铜活化传递成像法有效

消除了包括低能散射中子在内的各种辐射本底对快中子图像的影响, 获得了反应阈值以上能量的快中子图像. 铜活化传递成像法的缺点是成像效率低, 比富氢薄膜组合成像板方法低三个量级, 对快中子注量的要求较高; 而且由于活化反应的中子能量阈值固定, 很难满足任意能量下限的快中子图像测量. 在瞬态中子伽马混合辐射场中, 飞行时间法快中子成像技术^[12-14]可实现成像探测器对中子能量的区分, 并且消除伽马射线和背景散射中子对图像的影响. 但在某些实验装置条件下, 由于测量环境或者中子源强度和脉冲时间宽度、飞行距离等诸多因素的限制, 到达探测器的源中子强度无法满足成像要求, 难以获得高信噪比的图像.

针对散射中子比源中子能量低的特点, 在成像板前加富氢元素薄片的快中子成像方法^[15]中引入反冲质子卡阈片, 可消除大部分比源中子能量低的散射中子对图像的贡献, 从而有可能获得仅包含源中子贡献的图像. 本文首先利用基于GEANT4开

* 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基金(批准号: 2011B01013017)资助的课题.

[†] 通讯作者. E-mail: zhangfaqiang@tsinghua.org.cn

发的NPE程序^[16]计算了14 MeV中子在TR成像板组合不同厚度聚乙烯(PE)膜和几种金属薄膜的能量沉积,并给出了部分灵敏度实验标定结果;其次,在上述基础上针对14 MeV中子成像选定了组合式成像板探测器的结构参数,并对其散射中子滤除能力和分辨率进行了计算;最后,在K400中子加速器上开展了验证性实验,获得的中子图像中散射中子强度明显减少.文中所涉及灵敏度是成像结构受单位中子照射时输出的图像强度,近似与沉积能量成正比,所谓相对灵敏度是成像结构对不同能段中子的灵敏度之比.

2 成像原理

基于成像板的能量卡阈式快中子成像结构如图1所示,包含富氢薄膜、金属薄膜和成像板三个部分.富氢薄膜(如聚乙烯膜)将中子束二维强度分布转化为反冲氢核分布,通过选择合适的金属薄膜使大部分能量较低的反冲氢核沉积在其中,则利

用成像板荧光层探测到的反冲氢核图像反映中子束中较高能量中子的二维分布.成像板对质子具有较高的探测效率,文献^[17, 18]给出了成像板对0.15—20 MeV质子的灵敏度标定数据.

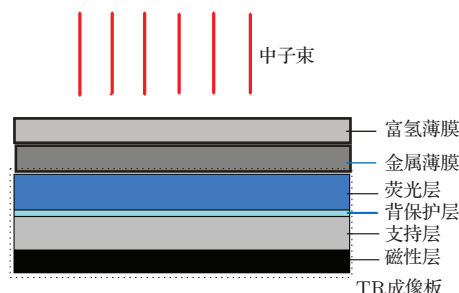


图1 基于成像板的能量卡阈式快中子成像结构示意图

我们选择Fuji公司的TR成像板(Fuji BAS-TR)作为反冲质子的记录介质. TR屏荧光层表面不含有机保护层,有利于降低成像板对中子的探测效率,增强金属滤片的质子卡阈效果^[19,20]. TR成像板的结构和组成如表1所列^[21].

表1 TR成像板主要结构和组成参数

结构	厚度 $d/\mu\text{m}$	密度 $\rho/\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	成分
荧光层	52	2.742	$\text{BaFBr}_{0.85}\text{I}_{0.15} : \text{NC}_3\text{H}_7\text{O}_2 = 20 : 1$
背保护层	11	1.375	$\text{C}_{10}\text{H}_8\text{O}_4$
支持层	247	1.375	$\text{C}_{10}\text{H}_8\text{O}_4$
磁性层	120	3.000	$77\%(\text{MnO} : \text{ZnO} : \text{Fe}_2\text{O}_3 = 1 : 1 : 1) + 23\%\text{NC}_3\text{H}_7\text{O}_2$
总计	430	—	—

3 成像结构设计

成像结构设计针对14 MeV DT中子展开.为达到中子能量卡阈的目的,要求金属薄膜阻止能量较低的反冲质子,通过选择金属薄膜材料和厚度,减弱甚至消除低能中子对图像的贡献.在设计过程中,我们使用了基于Geant4开发的NPE程序模拟快中子成像的辐射转换过程,这些过程包括快中子辐射转换为反冲核辐射、反冲核在卡阈片中的衰减及其在成像板中的能量沉积等辐射转换过程.

利用NPE程序计算的TR成像板覆盖不同类型薄膜后的DT中子能量沉积如图2所示.计算结果表明,TR成像板覆盖PE薄膜时能够显著提高灵敏度,如选择500 μm 厚度的PE膜作为反冲质子转

换体,则TR成像板对14 MeV中子灵敏度提高近4倍;同时,当厚度增加到500 μm 以上时,输出灵敏度增长幅度趋缓.针对500 μm PE膜、金属薄膜和TR成像板的成像结构,图2还包含了金属薄膜分别为不同厚度Al, Cu和Pb时DT中子在成像板上的能量沉积.该结果表明,在加入卡阈金属膜后,图像强度会随膜厚度增加而显著降低,特别是对于密度较高的Cu膜和Pb膜.对于密度较低的Al膜而言,几MeV能量的质子在其中的射程为mm水平,为达到卡阈效果需要较大的厚度值,这会降低图像分辨,不宜作为卡阈片材料.如图2所示,对于Pb膜和Al膜,卡阈片的厚度小于100 μm 时难以发挥阻止低能质子的作用,图像强度与不加金属膜时相比降低不足10%;卡阈片厚度大于400 μm 时又衰减了大量PE膜中产生的质子,图像强度与不加

PE膜时相比仅增加了不足30%。

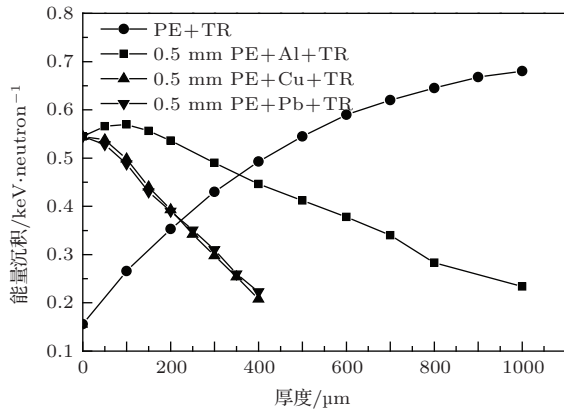


图2 TR成像板覆盖不同类型薄膜后的DT中子能量沉积

图3展示了Pb膜厚度变化时组合成像结构(500 μm厚PE膜、Pb膜组合TR成像板)对 neutron 能量响应的影响。图3表明,在含有Pb膜的成像结构中,TR成像板的中子能量沉积(近似为灵敏度的能量响应)曲线可分为三个部分:一是位于较低能段的能量平响应区,二是位于中间能段的灵敏度上升区,三是能量接近14 MeV的灵敏度峰值区。随着Pb膜厚度增加,中间能段的灵敏度上升区向高能方向偏移,同时较低能段的相对灵敏度也随之增加,这表明Pb膜厚度增加能够提高卡阈能量的上限,但是阈下能量中子相对灵敏度会有所增加,即卡阈效果会变差。例如,Pb膜厚度为150和300 μm时,成像结构对6 MeV中子相对灵敏度分别为16%和22%(卡阈效果变差);而两种膜厚情况下相对灵敏度32%所对应的中子能量却分别是8 MeV和约10 MeV(阈能量提高)。

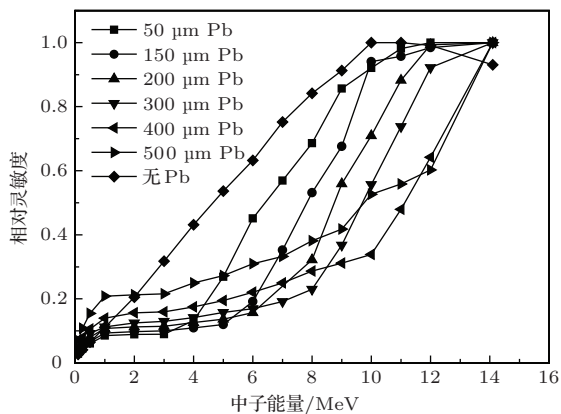


图3 快中子在成像结构(500 μm厚PE膜、Pb膜加TR成像板)中的能量沉积随Pb膜厚度的关系

综合上述结果,针对14 MeV DT中子的能量卡阈式成像结构可选用如下参数:PE膜厚约

500 μm,卡阈金属薄膜为100—300 μm Pb和TR成像板。实验中选用的PE膜厚511 μm,Pb卡阈片厚155 μm。下面便以此结构参数为例来分析能量卡阈效果。利用NPE程序计算的该结构对 neutrons 和伽马的能量响应如图4所示,为便于比较分析,图中还给出了TR成像板和TR成像板加511 μm PE膜对 neutrons 的能量响应,以及有无Pb膜时的中子能量响应之比*R*。计算结果表明,PE膜加TR成像板结构对 neutrons 的能量响应在10 MeV以下与中子能量成正比,在10 MeV附近出现峰值,之后随着能量增加快中子的探测效率降低,能量响应曲线呈下降趋势;相比于PE膜加TR成像板结构,含有155 μm厚Pb卡阈片的成像结构能有效降低8 MeV以下中子的能量沉积,达到与TR成像板能量响应相当的水平;有无Pb膜时两种成像结构的能量响应之比*R*在3—8 MeV能段明显低于2 MeV以下和10—14 MeV能段,仅为14 MeV时的20%—30%。这些结果表明,含511 μm厚PE膜和155 μm厚Pb膜的成像结构不仅大幅提高了10—14 MeV中子的探测效率,而且有效降低了3—8 MeV中子的探测效率,能够有效抑制14 MeV快中子照相中低能散射中子对图像的贡献。

图4中还包含了能量卡阈式成像结构对伽马射线的能量响应,1 MeV能量以下伽马射线在该测量结构中的能量沉积较高,但1 MeV以上伽马能量沉积与中子直照能量沉积基本相当,比14 MeV中子能量沉积低1/4。对于快中子照相常用的加速器中子源而言,在距源几十厘米范围内的MeV级伽马射线通常比中子低一个量级以上,因此伽马射线对该成像结构输出图像的贡献可以忽略。

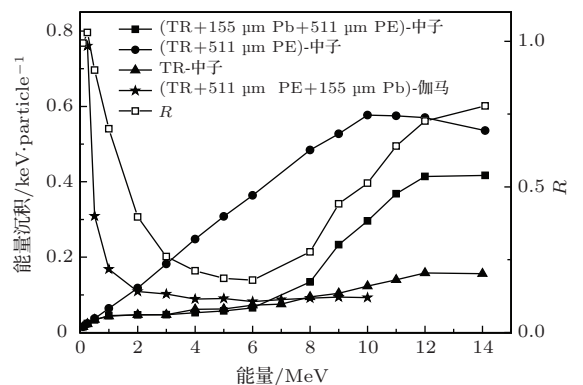


图4 中子和伽马在TR成像板组合中的平均能量沉积

为确定511 μm PE膜和155 μm Pb膜组合TR成像板对DT中子成像空间分辨的影响,使用NPE

程序模拟了14 MeV中子平行束(直径0.1 mm)入射到能量卡阈图像测量系统中形成的能量沉积空间分布,如图5所示.以图5中上图所示入射中子束轴心与成像板焦点为圆心,沿半径方向统计0.1 mm直径平行束中子经过成像结构后在不同半径处的每像素相对能量沉积.如图5中下图所示,在无Pb膜卡阈时,直径0.1 mm入射中子沿半径方向的能量沉积分布半高宽约220 μm ,峰值10%对应宽度为550 μm ;当增加150 μm Pb膜后,中子能量沉积分布半高宽约190 μm ,峰值的10%对应宽度为310 μm .可知Pb膜厚度在150 μm 时该能量卡阈成像结构反而提高了快中子图像的空间分辨.降低图像分辨的主要是具有大散射角的反冲质子,而这部分质子一方面能量较低、射程较短,另一方面角度较大导致卡阈片沿其轨迹方向的厚度增加,这些因素使得卡阈片厚度在一定范围内(与PE膜加成像板对中子空间分辨相当)有助于提高空间分辨.

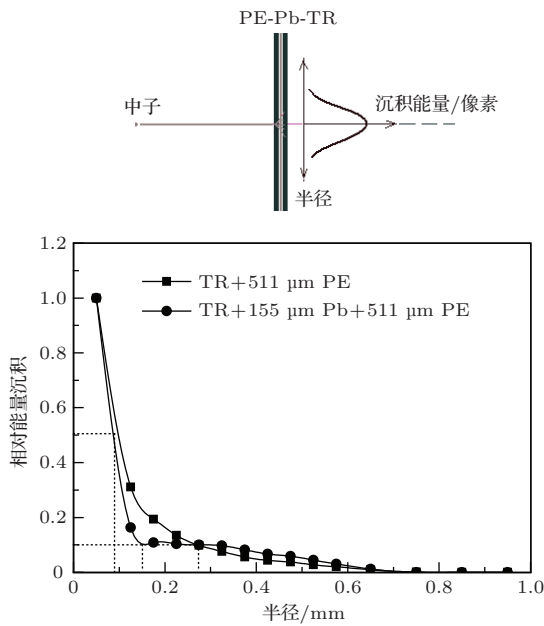


图5 能量卡阈式成像结构对14 MeV中子图像空间分辨的影响

4 能量卡阈式成像结构快中子成像实验

为验证NPE程序的部分计算结果,利用K400加速器DT中子源开展了能量卡阈式成像结构的中子灵敏度标定实验,测量了TR成像板覆盖不同厚度PE膜、覆盖511 μm PE膜和不同厚度Pb膜等成像结构对14 MeV中子的灵敏度,测量结果和

蒙特卡罗计算结果如图6和图7所示.图中各点14 MeV中子积分注量为 10^8 cm^{-2} ,蒙特卡罗计算值由NPE程序计算获得的沉积能量乘以定标系数获得.实验结果表明蒙特卡罗计算与实验测量结果在实验测量不确定度范围(约10%)内具有较好的一致性.

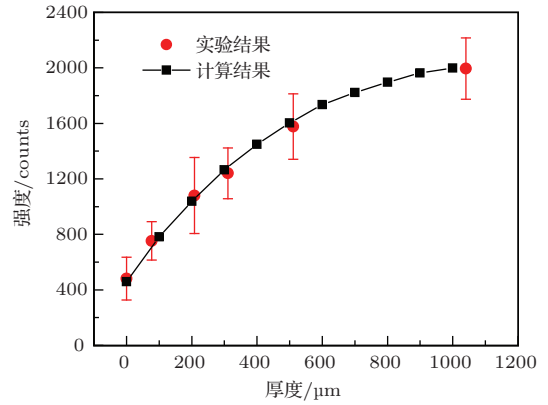


图6 TR成像板覆盖不同厚度聚乙烯薄膜的图像强度

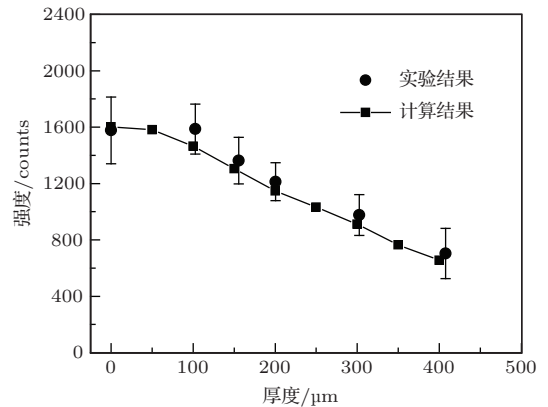


图7 TR成像板覆盖511 μm 聚乙烯加不同厚度Pb薄膜的图像强度

为验证能量卡阈式成像结构对低能量散射中子的抑制效果,在K400实验大厅进行了快中子照相实验.实验布局如图8所示,将W台阶样品紧贴成像板表面放置,快中子束垂直入射时由于散射中子的影响会在边界处产生边界增强效应^[22],即对应样品内侧区域的图像强度陡降,而对应外侧区域强度陡增.观察不同图像测量方式对边界增强效应的响应,即可判定该图像测量方式对散射中子是否敏感.W台阶样品分为三层,各台阶的样品厚度分别为1, 2和3 cm,各台阶均宽1,长3 cm,W样品外观尺寸为3 cm \times 3 cm.

图9和图10中左图分别为TR成像板覆盖511 μm PE膜和TR成像板覆盖155 μm Pb膜加

511 μm PE膜两种测量结构获得的W台阶样品快中子照相图像, 右图为左图中沿直线“1”方向的钨边界图像强度分布. 图像强度统计涨落约为10%—20%, 使用5阶多项式函数对强度曲线进行平滑处理. 图9中W边界两侧存在明显的边界增强效应, 反映了TR成像板覆盖PE膜对散射中子仍然灵敏, 而图10中边界增强效应并不明显. 为减

小图像统计涨落对边界增强效应的影响, 可沿垂直直线“1”方向小区域积分图像强度, 获得的W边界强度分布如图11所示. 图11中, 边界处钨样品一侧图像强度的最低值与内部区域强度平均值之比在有无Pb膜时分别为95%和88%, 这表明含有Pb膜作为卡阈片的成像结构确实能够有效减弱散射中子对图像强度的贡献.

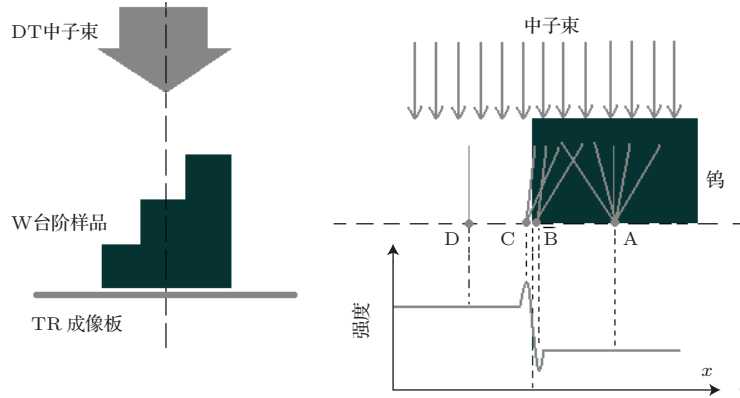


图8 快中子成像实验示意图

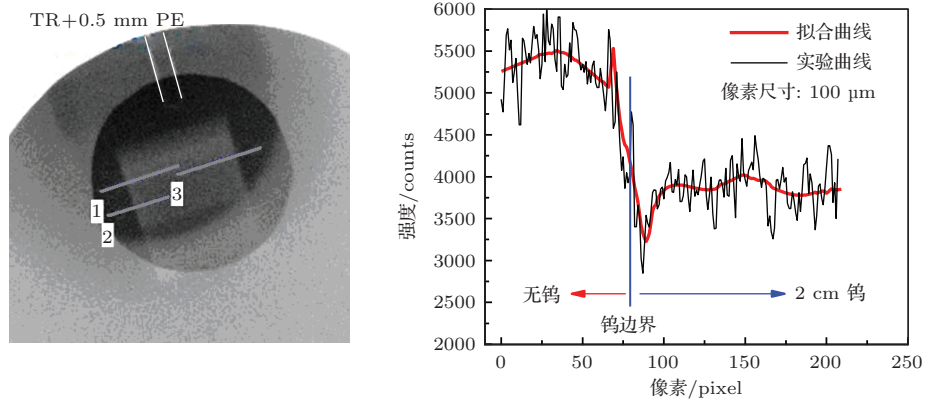


图9 (网刊彩色) TR+511 μm PE膜测量钨样品图像及边界强度分布

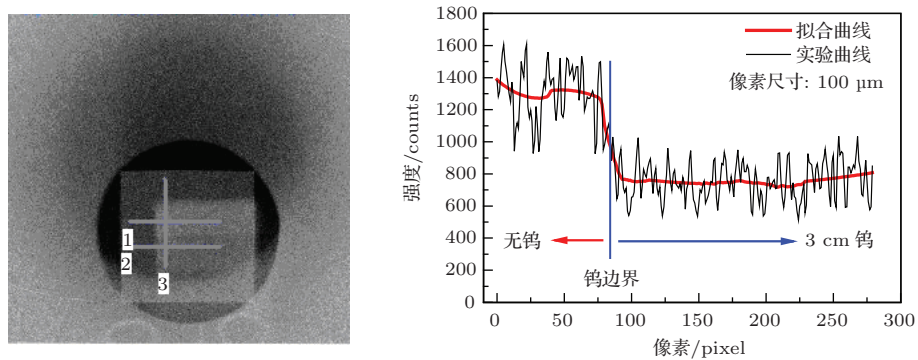


图10 (网刊彩色) TR+511 μm PE+0.16 mm Pb膜测量钨样品图像及边界强度分布

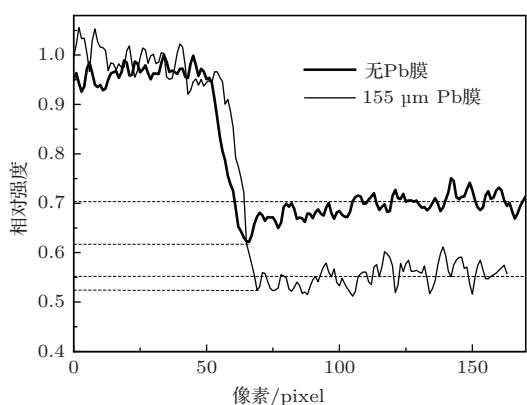


图 11 钨样品图像边界小区域积分强度分布

5 结 论

本文提出了在成像板和PE膜之间增加金属薄膜的方法以减弱成像板对低能中子的相对灵敏度. 利用蒙特卡罗程序NPE计算了成像板组合不同材料薄膜的中子能量沉积等数据, 并具体针对14 MeV中子开展了能量卡阈式成像结构的设计. 计算结果表明, 在TR成像板表面依次覆盖约150 μm Pb膜和500 μm PE膜后能够有效降低TR成像板对8 MeV以下快中子的相对灵敏度至14 MeV中子的30%以下, 而且相比于无金属膜时该成像结构还有助于提高图像的空间分辨.

在K400加速器上开展了多种成像结构灵敏度标定实验, 实验结果与蒙特卡罗计算结果符合较好. 在钨样品快中子照相实验中, 能量卡阈式成像结构获得的图像不存在明显的边界增强效应, 表明该结构能有效减弱散射中子对图像的贡献.

参考文献

[1] Disdier L, Rouyer A, Lantuejoul I, Landoas O, Bourgade J L, Sangster T C, Glebov V Y, Lerche R A 2006 *Phys. Plasmas* **13** 056317

[2] Fisher R K, Stephens R B, Disdier L, Bourgade J L, Rouyer A, Jaanimagi P A, Sangster T C, Lerche R A, Izumi N 2002 *Phys. Plasmas* **9** 2182

[3] Chen F X, Zheng J, Yang J L 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 5947 (in Chinese) [陈法新, 郑坚, 杨建伦 2006 物理学报 **55** 5947]

[4] Hall J M, Dietrich F, Logan C M, Schmid G J 1999 *Proc. SPIE* **3769** 31

[5] Dietrich F, Hall J M, Logan C M 1997 *AIP Conf. Proc.* **392** 837

[6] Chen G, Lanza R C 2002 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **49** 1919

[7] Yoshii K, Kobayashi H 1996 *Nucl. Instrum. Meth. A* **377** 76

[8] Ambrosi R M, Watterson J I W 1998 *Nucl. Instrum. Meth. B* **139** 279

[9] Zhang F Q, Yang J L, Li Z H, Ye F, Xu R K 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 1316 (in Chinese) [章法强, 杨建伦, 李正宏, 叶凡, 徐荣昆 2009 物理学报 **58** 1316]

[10] Zhang F Q, Yang J L, Li Z H, Ying C T, Liu G J 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 3577 (in Chinese) [章法强, 杨建伦, 李正宏, 应纯同, 刘广均 2007 物理学报 **56** 3577]

[11] Mikerov V, Samosyuk V, Verushkin S 2005 *Nucl. Instrum. Meth. A* **542** 192

[12] Loveman R, Bendahan J, Gozani T, Stevenson J 1995 *Nucl. Instrum. Meth. B* **99** 765

[13] Dangendorf V, Laczko G, Reginatto M, Vartsky D, Goldberg M, Mor I, Breskin A, Chechik R 2005 *Nucl. Instrum. Meth. A* **542** 197

[14] Dangendorf V, Lauck R, Kaufmann F, Barnstedt J, Jagutzki O, Kraemer M, Vartsky D 2006 *Proceedings of International workshop on fast neutron detectors and applications* Cape Town, South Africa, April 3-6, 2006 p8

[15] Matsubayashi M, Hibiki Takashi, Mishima K, Yoshii K, Okamoto K 2001 *Nucl. Instrum. Meth. A* **463** 324

[16] Fu L, Zhang J H, Qi J M, Zhang F Q, Xie H W, Chen J C 2012 *High Power Laser and Particle Beams* **24** 2230 (in Chinese) [付澜, 张建华, 祁建敏, 章法强, 谢红卫, 陈进川 2012 强激光与粒子束 **24** 2230]

[17] Mori M, Kando M, Pirozhkov A S, Hayashi Y, Yogo A, Yoshimura N, Ogura K, Nishiuchi M, Sagisaka A, Ori-mo S, Kado M, Fukumi A, Li Z, Nakamura S, Noda A, Daido H 2006 *Plasma and Fusion Research* **1** 42

[18] Mancic A, Fuchs J, Antici P, Gaillard S A, Audebert P 2008 *Rev. Sci. Instrum.* **79** 073301

[19] Qi J M, Zhou L, Jiang S L, Zhang J H 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 245203 (in Chinese) [祁建敏, 周林, 蒋世伦, 张建华 2013 物理学报 **62** 245203]

[20] Qi J M, Zhang F Q, Chen J C, Xie H W 2014 *Chin. Phys. C* **38** 016001

[21] Fuji Film www.fujifilmfscienceusa.com [2014-03-01]

[22] Harms A A, Wyman D R 1986 *Mathematics and Physics of Neutron Radiography* (Dordrecht: D. Reidel Publishing Company)

A method of fast-neutron imaging with energy threshold based on an imaging plate*

Zhang Fa-Qiang[†] Qi Jian-Min Zhang Jian-Hua Li Lin-Bo Chen Ding-Yang
Xie Hong-Wei Yang Jian-Lun Chen Jin-Chuan

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

(Received 3 March 2014; revised manuscript received 17 March 2014)

Abstract

A method of fast-neutron imaging with energy threshold is presented in this paper, which is based on an imaging plate covered with a metal foil and a hydrogen-rich foil in order to reduce the contribution from the neutrons with a lower energy such as the scattering neutrons from samples. The method is capable of effectively reducing the relative sensitivity of the imaging detector to neutrons with energies in a certain energy range. The 14 MeV neutron imaging structure with an energy threshold is designed, and it includes a TR imaging plate covered with an about 150 μm Pb foil and a 500 μm polyethylene foil. The calculated results show that for the present structure its sensitivity to the neutrons with smaller than 8 MeV is reduced by 30% less than that to the neutrons with 14 MeV. The fast-neutron radiography is validated experimentally on a DT neutron generator (K400). The results indicate that the neutron imaging structure with an energy threshold is available to remove the edge enhancement effect introduced by scattering neutrons from samples.

Keywords: fast-neutron radiography, Monte Carlo simulation, energy threshold, imaging plate

PACS: 87.57.Va, 87.57.C-, 87.15.ak, 52.70.-m

DOI: 10.7498/aps.63.128701

* Project supported by the Young Scientists Fund of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 11005095) and the Science Foundation of China Academy of Engineering Physics (Grant No. 2011B01013017).

[†] Corresponding author. E-mail: zhangfaqiang@tsinghua.org.cn