

高灵敏度的快中子照相系统*

章法强¹⁾²⁾ 杨建伦²⁾ 李正宏²⁾ 钟耀华²⁾ 叶 凡¹⁾²⁾ 秦 义²⁾ 陈法新²⁾ 应纯同¹⁾ 刘广均¹⁾

1) 清华大学工程物理系, 北京 100084)

2) 核物理与化学研究所, 绵阳 621900)

(2005 年 11 月 16 日收到, 2006 年 6 月 12 日收到修改稿)

快中子照相系统由闪烁光纤阵列和科学级可见光 CCD 等元件组成. 14 MeV D-T 聚变中子在穿透样品后进入 50 mm × 50 mm 闪烁光纤阵列, 中子辐射转换为波长 496 nm 的绿光. 光纤阵列长 100 mm, 光纤截面 500 μm × 500 μm, 100 × 100 根闪烁体光纤组成阵列. 阵列对 14 MeV 中子探测效率经估算可达 21.4%. CCD 与光纤阵列之间采用反射镜和透镜耦合方式, 使 CCD 避开中子源直接辐射. 综合考虑光纤尺寸、CCD 记录噪声及中子源与受照样品几何关系等因素, 理论上系统可获得整体分辨率 1.5 mm 的中子图像. 在 K400 直流加速器中子源上进行了初步实验, 获得了中子图像.

关键词: 14 MeV 中子, 射线照相, 闪烁光纤阵列

PACC: 8170L, 2940M, 2540C

1. 引 言

快中子照相是近年来发展迅速的射线照相技术^[1-6], 其原理与热中子照相、X 射线照相、γ 照相以及 α 粒子照相^[7]类似, 都是利用射线在物体中穿透能力的差异来对物体进行透视, 以洞察物体内部的结构状况. 由于快中子在物质中的穿透能力强, 相对于其他照相技术, 快中子照相可以对体积更大、密度更高的材料进行照相^[2, 8]. 因此, 快中子照相作为一种无损检测方法, 已成为热中子照相、X 射线照相和 γ 照相等技术的重要补充^[9], 并在众多领域有广泛应用^[2, 10, 11].

快中子与辐射转换体作用截面小, 不易被记录, 使得中子图像记录成为技术瓶颈^[12-14]. 常见的快中子辐射转换屏和中子图像气泡探测器^[15]等受各种因素限制, 中子探测效率低, 要得到高质量的中子图像必须提高中子注入量, 在中子源强较低的情况下, 照相时间很长, 难以与现有快中子源匹配构成实用化的照相系统. 另外, 普通辐射转换屏时间响应慢, 不可能实现瞬变物体结构的动态照相.

由闪烁光纤阵列和电荷耦合装置 (charge coupled device, CCD) 组成的中子照相系统中, 14 MeV D-T 源中子首先经过聚乙烯准直器准直. 准直器置

于源与闪烁光纤阵列中间位置, 以减少进入闪烁体的散射中子. 准直中子穿透样品进入闪烁体, 注入量由 Φ_0 变为

$$\Phi = \Phi_0 e^{-\rho T N_0 \sigma / A} = \Phi_0 e^{-\Sigma_0 T},$$

式中 N_0 , ρ , T , A , σ 和 Σ_0 分别为阿伏伽德罗常数和样品的密度、厚度、质量数、微观截面及宏观截面. 因为各种材料与快中子微观作用截面小, 所以当材料 ρT 很大时, 也有相当数量中子穿透样品, 这为实现高密度大体积物体照相提供了可能性. 在闪烁体中, 14 MeV D-T 中子与闪烁体发生 (n, p) 反应的中子平均自由程 $\Sigma_p^{-1} = 30$ cm, 易得闪烁体对 14 MeV 中子的探测效率 $\eta = N_H \sigma_H / (N_C \sigma_C + N_H \sigma_H) \cdot (1 - e^{-\Sigma d}) = 21.4\%$, 其中 $d = 10$ cm 为闪烁光纤阵列厚度, $\Sigma = N_C \sigma_C + N_H \sigma_H$ 为中子与闪烁体作用宏观总截面. 与中子碰撞后的反冲核获得部分中子能量, 在闪烁光纤中慢化时产生中心波长 496 nm 的荧光. 荧光经光纤导出由反射镜改变光路耦合至透镜, 由科学级可见光 CCD 成像并输出 16 位图像文件至计算机. 计算得出的闪烁光纤阵列对中子探测效率高达 21.4%, 配合高灵敏度科学级可见光 CCD 记录系统, 这使得对中子注入量要求相对较低, 易与现有中子源匹配. 并且闪烁体荧光衰减时间小于 3 ns, 如采用门控 CCD 则可具有瞬态中子成像能力.

* 中物院双百人基金 (批准号 2004R0301) 和核物理与化学研究所创新基金资助的课题.

2. 系统基本硬件组成

本文介绍的中子照相系统如图 1 所示. 辐射转换体选用闪烁光纤阵列. 闪烁荧光衰减时间 2.7 ns , 闪烁效率 $\tau_s = 2.4\%$. 阵列有效探测面积 $50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$, 由 100×100 根长度 100 mm 截面 $500 \mu\text{m} \times 500 \mu\text{m}$ 的方光纤构成. 光纤芯材料聚苯乙烯, 折射率 $n_{cr} = 1.6$; 涂层材料丙烯酸, 折射率 $n_{cl} = 1.49$, 厚度为光纤芯的 4% ; 光纤间涂有 EMA 光吸收层, 可避免光窜扰. 对于各向同性的荧光, 光纤光收集效率 $\tau_c = 4.4\%$. 在阵列的中子入射端面紧贴厚度 1 mm 的玻璃高反镜 ($450 \text{ nm} - 550 \text{ nm}$ 波长范围内, 反射率大于 99%) 以提高光收集效率至 8.8% , 光耦合剂为硅油, 折射率 1.4 . 为使 CCD 芯片在工作时免受中子束辐照, 闪烁光纤阵列输出的荧光经 45° 高反镜反射后由透镜耦合至 CCD 相机记录.

选用科学级 CCD 相机记录中子图像. CCD 像素数 1340×1300 , 像素尺寸 $20 \mu\text{m} \times 20 \mu\text{m}$, 分辨率 25 线对/mm . 芯片工作温度 -45°C , 单像素势阱饱和电荷 300 K 电子 , 饱和计数 $2^{16} - 1 = 65535$, 读出噪

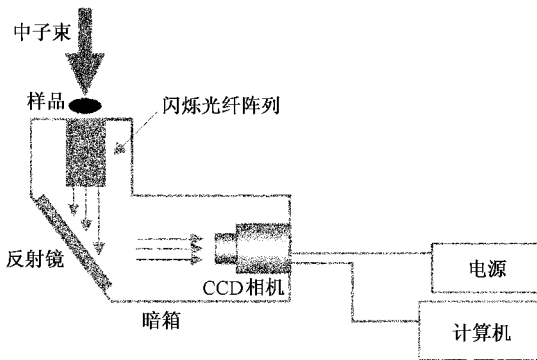


图 1 高探测效率的快中子成像系统原理图

声 4 电子/像素 , 暗电流噪声 $1 \text{ 电子/像素} \cdot \text{s}$. 闪烁光纤阵列和 CCD 相机置于暗箱内, 暗箱材料为不锈钢 ($1\text{Cr}18\text{Ni}9\text{Ti}$) 壁厚 2 mm . 为减少光在箱内的反射, 箱壁植黑绒, 而且箱内光学调整架均经过表面发黑处理.

3. 系统设计及性能

3.1. 影响中子图像分辨率的各种因素

影响中子图像分辨率的主要因素有中子源与受

照样品几何关系, 中子在闪烁体中的点扩散函数, 闪烁体光纤尺寸及图像记录噪声等^[16, 17]. 当中子束平行于光纤时, 中子源对系统分辨率的影响会降至最小. 设中子束入射方向与光纤夹角 α ($\alpha \ll 90^\circ$), 中子进入闪烁光纤阵列行程 x 后被探测, 则对系统分辨率的影响 $\delta_d = \sin\alpha \cdot x$. 事实上, 中子在闪烁体中的行程 x 是一个随机变量, 其概率密度函数 $f(x) = \Sigma e^{-\Sigma \cdot x} / \eta$. 对点中子源而言, 通过调整闪烁体位置可使源中子束在阵列表面中心位置垂直入射, 因而入射源中子与光纤夹角 $\alpha = \arctg(r/L)$, 式中 r 为中子入射点与阵列探测表面中心之间距离, L 为点中子源至阵列表面距离. 所以

$$\delta_d = \frac{\int_0^{r_{\max}} \int_0^{d/\cos\alpha} x \cdot \sin\alpha \cdot f(x) 2\pi r dx dr}{\int_0^{r_{\max}} 2\pi r dr} \approx \frac{0.8}{L} \text{ mm}, \quad (1)$$

式中 $r_{\max} = 2.5 \text{ cm}$, L 的单位为 m . 然而实际中并不存在理想点中子源. 一般 14 MeV 中子源尺寸为毫米量级, 设中子源特征尺度为 a , 单位 mm . 同理可得, 源对中子图像的影响,

$$\delta_s = \frac{\int_0^a \int_0^{10} x \cdot \sin\beta f(x) dx 2\pi r' dr'}{\int_0^a 2\pi r' dr'} \approx \frac{0.03a}{L} \text{ mm}, \quad (2)$$

式中 $\sin\beta = r'/L$, r' 是中子源中任意一点距源中心的距离.

快中子在闪烁体中与氢核或碳核的作用以弹性碰撞为主. 由于碳核较重, 反冲碳核获得能量是反冲氢核的 28% , 而且相同能量时, 碳核产生荧光的能力远低于氢核. 因此, 在计算闪烁体中荧光产额时仅考虑快中子与氢核的弹性碰撞. 14 MeV 中子与氢核碰撞后, 反冲氢核能量在 $0 - 14 \text{ MeV}$ 范围内均匀分布, 其角分布的概率密度函数近似为^[18]

$$g(\varphi) = \sin(2\varphi), \varphi \in [0^\circ, 90^\circ], \quad (3)$$

式中 φ 为反冲氢核与中子入射方向夹角. 氢核在闪烁体中的射程可由 TRIM 程序计算, 射程与能量的关系并非线性, 如图 2 所示. 质子在闪烁体中慢化时荧光产额与其能量关系可表述为^[19]

$$N_{\text{ph}} = C \cdot E_p^{3/2}, \quad (4)$$

式中 C 为常数, 在闪烁光纤阵列中可估计为 1.3×10^3 ^[20]; E_p 为反冲氢核能量. 设 14 MeV 点源中子垂直入射闪烁体表面, 则通过蒙特卡罗方法计算得到闪烁体中距离中子入射轴线 r_{ph} 半径内区域的相对

荧光产额,如图 3 所示. 计算表明 $r_{ph} < 0.4$ mm 区域内的荧光产额占总产额 50% 以上. 即假设入射中子方向与闪烁体光纤平行时,由中子辐射转换的荧光其分布函数半高宽约 $\delta_r = 0.8$ mm. 中子图像每像素对应一根光纤,由抽样定理决定的中子图像分辨率 $\delta_N = 1$ mm.

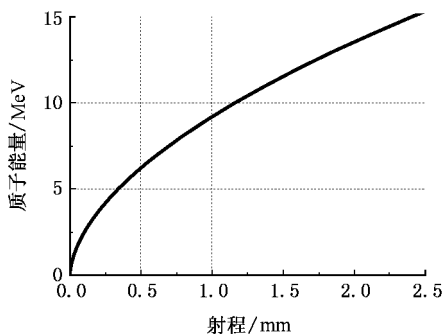


图 2 质子在闪烁体中的射程与能量关系

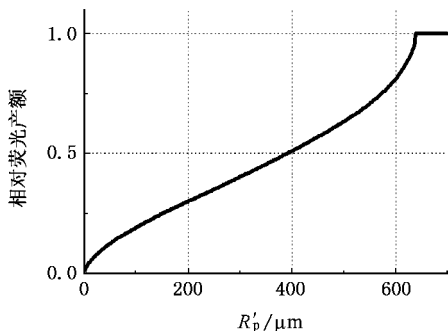


图 3 在垂直中子入射方向平面上的荧光分布概率函数

综合上述因素,系统的分辨率可估计为

$$\Delta = \sqrt{\delta_d^2 + \delta_s^2 + \delta_r^2 + \delta_N^2}. \quad (5)$$

在 K400 中子发生器上进行的实验中,中子源尺寸约 12 mm, L 为 1—2 m, 计算得到中子图像分辨率约 1.5 mm.

3.2. 系统灵敏度

设 14 MeV 中子注入量 N mm⁻², 则每根光纤探测到的中子数为 $0.25 \cdot N \cdot \eta$. 平均地,质子在和 14 MeV 中子碰撞过程中获得 7 MeV 能量. 考虑到光纤收集效率 $2\tau_c$, 传输效率 $\tau_t > 97\%$. 每根光纤输出光子数为

$0.25 \cdot N \cdot \eta \times C \cdot E_p^{3/2} \times 2\tau_c \times \tau_t = 1.1 \times 10^2 \cdot N$. 闪烁光纤阵列输出中心波长 496 nm 绿光经 45°高反

镜(反射率 > 99%)反射至透镜耦合,耦合效率 ϵ 与透镜的 $f/\#$ 和像缩小倍数 m 有关,具体可表达为

$$\epsilon = \frac{1}{n_{cr} - \sqrt{n_{cr}^2 - N_A^2}} \cdot \left[n_{cr} - \sqrt{n_{cr}^2 - \frac{1}{4 \cdot (f/\#)^2 \cdot (m+1)^2} + 1} \right], \quad (6)$$

式中 $N_A = 0.58$, 为光纤数值孔径. 其中 $f/\# \sim 1.0$, $m = 3.6$. 计算得,透镜耦合效率 $\epsilon \approx 3.3\%$. 组合透镜透射率 $\tau_{lens} = 60\%$. 在 500 nm 波长附近 CCD 量子效率 $\epsilon_{CCD} = 75\%$. 所以 CCD 每像素产生电荷 $1.1 \times 10^2 N \epsilon \tau_{lens} \epsilon_{CCD} / \left(\frac{500 \mu\text{m}}{m \times 20 \mu\text{m}} \right)^2 = 3.4 \times 10^{-2} N$ 电子/像素. 在 CCD 读取并转化为 16 位图像文件时,相当于 $6.5 \times 10^{-3} N$ 计数/像素.

CCD 置于暗箱中并非完全避光. 在暗箱中实测平均本底计数达 1 计数/像素·s. 原则上,当中子注量率 $N/t > 460$ mm⁻²·s⁻¹ 时,即可获得信噪比大于 3 的中子图像. 然而,中子辐射转换至 CCD 像素的电荷数是符合泊松分布的随机变量,统计涨落引起的相对均方差 σ_r 正比于 $N^{-1/2}$, 若 N 较小时,泊松噪声将会严重影响图像质量. 事实上,在照相时,中子辐射本底在图像中附加的椒盐噪声密度均匀地随机分布于中子图像上,会极大的损害成像质量,有必要对 CCD 进行中子辐射屏蔽.

3.3. 系统屏蔽

系统屏蔽主要目的是减少 CCD 芯片中子辐照剂量,减少由辐射本底造成的图像噪声. 中子辐射会在 CCD 半导体内产生缺陷^[21]. 这些缺陷一方面会成为载流子产生中心,增加暗电流;另一方面还会在像素间电荷转移时俘获信号电荷,使转移损失率增加. 一般 CCD 可接受剂量上限约 2 mrad^[22]. 在 CCD 距中子源为 2 m 时,由 MCNP 模拟计算 CCD 芯片吸收剂量为 2×10^{-13} mrad/n. 实验中选用屏蔽体由中子源至 CCD 依次为 70 cm 聚乙烯,6 cm 铁和 10 cm 铅,计算芯片吸收剂量为 2×10^{-15} mrad/n.

4. 实验结果

在 K400 中子发生器上进行了实验,对这套系统进行了初步测试. K400 中子发生器加速氘核轰击氘靶,在与氘核加速方向 80°夹角产生 14 MeV 准单

能中子,中子产额 3×10^{10} n/s. 氚靶直径 12 mm. 闪烁光纤阵列距中子源 1—2 m. 聚乙烯准直器准直比 5. 图 4 是无样品时,中子图像的直方图,照相时间 $T_e = 200$ s. 图中有两个像素计数统计峰,分别对应图像本底 200 计数/像素和减去本底后的信号 900 计数/像素. 经过计算, $T_e = 200$ s, $L = 2$ m 时,中子图像信号应当为 $1.1 \times 10^{-2} N = 800$ 计数/像素,这与实验值基本相符.

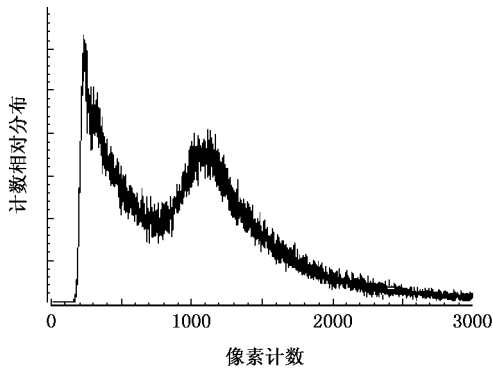


图 4 $T_e = 200$ s, $L = 2$ m 无样品时中子图像直方图

图 5(a)是一组不锈钢样品的中子图像, $T_e = 200$ s. 样品厚度均为 5 cm,宽度由左至右分别为 3 mm,5 mm 和 8 mm. 图 5(b)是不锈钢和聚乙烯混合样品的中子图像, $T_e = 600$ s. 图中左边是厚度 5.5 cm,宽度 2 cm 的聚乙烯板,聚乙烯样品从上至下分别有直径 6 mm,5 mm,4 mm 和 3 mm 的通孔,孔边缘间距 3 mm. 右边是厚度 5 cm,宽度 5 mm 的不锈钢板.

原始图像因中子辐射本底造成的椒盐噪声过强而显得可读性较差. 首先对图 5 进行形态滤波(morphological filtering)处理,即以 3×3 的方阵为结构元素矩阵对图 5 进行开运算;然后进一步对图形进行低通滤波(low pass filtering)得到如图 6 的图像. 从图 6 来看,3 mm 的钢板和聚乙烯样品上 $\Phi 3$ mm 的通孔及通孔之间 3 mm 的间距明显可辨. 另外,5 cm 钢板的图像对比度明显高于 5.5 cm 聚乙烯的图像对比度. 从图中还可看出,样品间图像亮度值相对图像边缘较高. 这是由于在这个区域经样品散射后进入闪烁体的中子数目较多. 事实上,由图 6(b)可看出聚乙烯样品中的通孔已变形为椭圆,这表明聚乙烯样品通孔方向与中子束平行度较差.

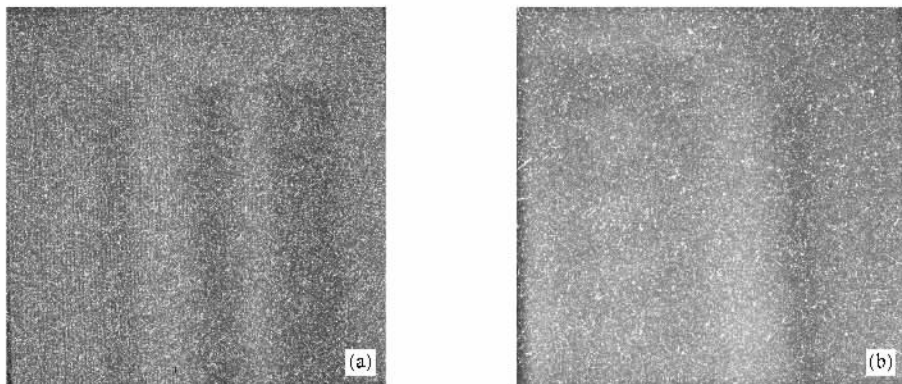


图 5 快中子照相原始图像 (a) $T_e = 200$ s, $L = 2$ m;(b) $T_e = 600$ s, $L = 1$ m

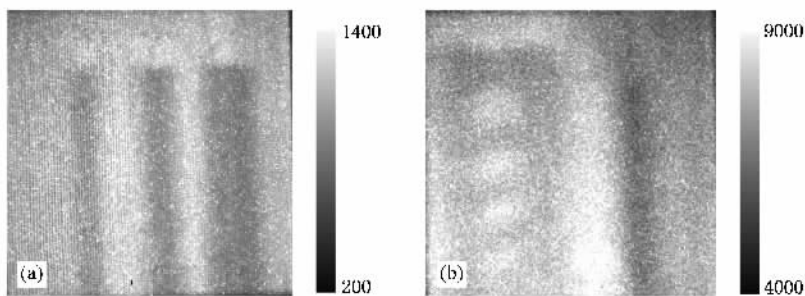


图 6 图 5 经图像处理后的效果 (a) $T_e = 200$ s, $L = 2$ m;(b) $T_e = 600$ s, $L = 1$ m

5. 讨 论

实验结果证明,以闪烁光纤阵列为中子辐射转换体,结合科学级可见光 CCD 为记录介质的快中子照相系统灵敏度较高。在强辐射环境下获得的中子图像经降噪处理后,图像质量较好。但是另一方面,中子辐射本底对图像的影响严重,这从图 5 可以看出。在以后实验中还需进一步完善对 CCD 的屏蔽。另外,实验中透镜耦合效率低,组合透镜透过率也较低,这实际上降低了图像信噪比。新设计的耦合光

路将采用短焦大通光口径的透镜,可以将像缩小倍数减小至 $m = 2$,并由光导耦合至 CCD 芯片,估计耦合效率将会高于 10%。

为实现物质结构的瞬态照相,以低噪声高增益的门控 ICCD 为记录系统主体,以产额 10^{10} n/脉冲的等离子体焦点装置(dense plasma focus, DPF)为中子源的快中子瞬态照相系统正在考虑中。

本工作得到了彭太平、郭洪生和李如荣研究员的支持,实验工作在 K400 中子发生器物理运行组工作人员的配合下才得以顺利完成,作者在此一并表示感谢。

- [1] Matsubayashi M, Hibiki T, Mishima K, Yoshii K, Okamoto K 2003 *Nucl. Instr. and Meth. A* **510** 325
- [2] James H, Dietrich F, Logan C, Schmid G 1999 *SPIE* **3769** 31
- [3] Fujine S, Yoneda K, Yoshii K, Kamata M, Tamaki M, Ohkubo K, Ikeda Y, Kobayashi H 1999 *Nucl. Instr. and Meth. A* **424** 190
- [4] Ambrosi R M, Fraser G W, Feller B, Street R, Watterson J I W, White P, Downing G 2003 *Nucl. Instr. and Meth. A* **500** 351
- [5] van der Hagen T H J J, de Haan V O, de Leege P F A 2004 *Nucl. Instr. and Meth. A* **517** 264
- [6] Jiang S P, Chen L, Chen Y, Du H J, Wang Z M, Fang Y M, Han R D 2005 *Nucl. Techniques* **28** 151 (in Chinese) [蒋诗平、陈亮、陈阳、杜淮江、王忠民、范扬眉、韩荣典 2005 *核技术* **28** 151]
- [7] Fews A P, Lamb M J, Savage M 1994 *Laser Part. Beams* **12** 1
- [8] Klann R T 1997 *Proceedings of the Fifth World Conference on Neutron Radiography* (Berlin : DGZFP) p382
- [9] Berger H 2004 *Applied Radiation and Isotopes* **61** 437
- [10] Kim K H, Klann R T, Raju B B 1999 *Nucl. Instr. and Meth. A* **422** 929
- [11] Takenaka N, Asano H, Fujii T, Mizubata M, Yoshii K 1999 *Nucl. Instr. and Meth. A* **424** 73
- [12] Yang H Q, Zhu X B, Yang G Z, Li L B, Song X C 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 3321 (in Chinese) [杨洪琼、朱学彬、杨高照、李林波、宋献才 2004 *物理学报* **53** 3321]
- [13] Yang H Q, Yang J L, Wen S H, Wang G X, Guo Y Z, Tang Z Y, Mou W B, Ma C 2001 *Acta Phys. Sin.* **50** 2408 (in Chinese) [杨洪琼、杨建伦、温树槐、王根兴、郭玉芝、唐正元、牟维兵、马 驰 2001 *物理学报* **50** 2408]
- [14] Yang J L, Wang G X, Zhu Q H, Wen S H, Liu Z L, Yang H Q, Tang Z Y 1999 *Chin. Phys.* **8** 768
- [15] 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
- [16] Ambrosi R M, Watterson J I W 1998 *Nucl. Instr. and Meth. B* **139** 279
- [17] Tang B 2004 *Nuclear Electronics & Detection Technology* **22** 387 (in Chinese) [唐 彬 2004 *核电子学与探测技术* **22** 387]
- [18] Ji C S 1998 *Neutron Detection Experiment Method* (Beijing : Atomic Energy Press) p66 (in Chinese) [汲长松 1998 *中子探测实验方法* (北京 : 原子能出版社) 第 66 页]
- [19] Knoll G F 1979 *Radiation Detection and Measurement* (New York : John Wiley & Sons Press) p250
- [20] Zhang F Q, Yang J L, Li Z H, Chen F X, Ying C T, Liu G J 2006 *High Power Laser and Particle Beams* **18** 325 (in Chinese) [章法强、杨建伦、李正宏、陈法新、应纯同、刘广均 2006 *强激光与粒子束* **18** 325]
- [21] Chen P X 2005 *Radiation Effects on Semiconductor Devices and Integrated Circuits* (Beijing : National Defence Industry Press) p384 (in Chinese) [陈盘训 2005 *半导体器件和集成电路的辐射效应* (北京 : 国防工业出版社) 第 384 页]
- [22] Disdier L, Rouyer A, Wilson D C, Fedotoff A, Stoeckl C, Bourgade J L, Glebov V Y, Garconnet J P, Seka W 2002 *Nucl. Instr. and Meth. A* **489** 496

High-sensitivity fast neutron radiography system^{*}

Zhang Fa-Qiang^{1,2)} Yang Jian-Lun²⁾ Li Zheng-Hong²⁾ Zhong Yao-Hua²⁾ Ye Fan^{1,2)} Qin Yi²⁾ Chen Fa-Xin²⁾
Ying Chun-Tong¹⁾ Liu Guang-Jun¹⁾

¹ *Department of Engineering Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China*

² *Institute of Nuclear Physics and Chemistry, Mianyang 621900, China*

(Received 16 November 2005 ; revised manuscript received 12 June 2006)

Abstract

Introduced in this paper is a fast neutron radiography system, which is mainly composed of a scintillation fiber array and a scientific grade optical CCD. The 14 MeV neutrons produced by deuterium-tritium fusion reactions, penetrate through objects and fall into a 50 mm × 50 mm scintillation fiber array, and the neutron radiation is converted to green light (496 nm). The array has a length of 100 mm, consisting of 100 × 100 square scintillation fibers each with a cross-section of 500 μm × 500 μm. For 14 MeV neutrons, the detection efficiency is as high as 21.4%. To avoid direct radiation from neutrons, the CCD is coupled to the array by a mirror and lens optics. By taking into account the factors affecting image quality, the resolution is estimated to be 1.5 mm. Several neutron radiographs have been obtained successfully in experiments carried out on K400 neutron generator.

Keywords : 14 MeV neutron, radiography, scintillation fiber array

PACC : 8170L, 2940M, 2540C

^{*} Project supported by the Foundation of Double-Hundred Talents of China Academy of Engineering Physics (Grant No. 2004R0301) and the Innovation Foundation of Institute of Nuclear Physics and Chemistry.