

一种新型的液闪阵列成像屏空间分辨特性*

张美† 李奎念 李阳 盛亮 张艳红

(西北核技术研究院, 强脉冲辐射环境模拟与效应国家重点实验室, 西安 710024)

(2019年10月10日收到; 2019年11月29日收到修改稿)

针对低强度射线成像, 自主研制了一种像元为 0.1 mm 高探测效率的液闪阵列屏. 为此, 基于倾斜刀口边缘响应的测量原理, 建立了理论模拟方法和实验研究方法, 对该液闪阵列屏开展了空间分辨性能研究. 通过理论模拟, 给出了液闪阵列屏在 14 MeV 中子和 1.25 MeV 伽马射线激发下的调制传递函数, 并与像元为 0.1, 0.3 和 0.5 mm 的闪烁纤维阵列屏进行了理论对比. 在 ^{60}Co 伽马射线源上, 对液闪阵列屏和像元为 0.3 和 0.5 mm 的两种国产闪烁纤维阵列屏进行了调制传递函数实测研究. 理论模拟和实验结果一致, 均表明液闪阵列的空间特性优于闪烁纤维阵列屏, 而且具有更好的均匀性, 对 1.25 MeV 伽马, 空间分辨接近 0.9 lp/mm, 而其他两种纤维阵列屏仅达到 0.5 lp/mm, 对于 14 MeV 中子, 液闪阵列屏的空间分辨可达到 1.8 lp/mm.

关键词: 新型液闪阵列成像屏, 边缘倾斜扩展函数, 调制传递函数, 射线成像

PACS: 28.20.Pr, 29.40.Mc

DOI: 10.7498/aps.69.20191545

1 引言

在脉冲辐射场成像技术中, 需通过射线成像屏, 把经过针孔或编码孔形成的射线图像转换成可记录的可见光图像^[1-7]. 闪烁体是最常用的射线成像屏材料, 针对不同的射线, 主要有无机闪烁体和有机闪烁体成像屏两类^[8-11]. 基于闪烁体的成像屏一直是射线成像探测领域研究的热点, 在快响应时间、高探测效率和高空间分辨等性能方面在不断地发展改进. 特别是针对惯性约束聚变和 Z-pinch 驱动聚变的中子图像诊断, 图像系统的空间分辨要求达到几十微米, 而这些聚变装置的产额目前还较低, 要求成像屏除了满足空间分辨的需求外, 还要具有高的探测效率和快的响应时间, 以获得高质量的时间分辨图像^[12-14].

为解决同时满足高时空分辨和高探测效率这一难题, 阵列型成像屏被提出研究, 在不改变的空

间分辨的前提下, 通过加大阵列的厚度进一步提高探测效率. 国外研究者针对惯性约束聚变中子图像诊断需求, 对闪烁纤维屏和毛细管液闪阵列屏先后做了大量研究, 其像元尺寸从毫米到几十微米量级. 由于闪烁纤维的工艺技术限制, 单像元小于 0.2 mm 闪烁纤维阵列屏难以实现, 国外研究者通过石英毛细管液闪阵列, 使得单像元尺寸达到了 65 μm , 并用于国家点火装置诊断中^[15-17]. 国内对闪烁纤维阵列屏研究相对较多, 目前还未见石英毛细管液闪阵列屏的详细报道. 由于超细石英毛细管加工、排列和液闪均匀灌装等都存在极大难度, 成品率低, 国外的成品对国内禁运, 难以购得. 为此自主开发了一种像元为 0.1 mm 的新型液闪阵列屏, 本文对该阵列屏从理论和实验两方面开展空间分辨特性研究, 并与常见的几种国产闪烁纤维屏进行比较, 研究结果表明研制的新型液闪阵列屏具有好的空间分辨能力. 该阵列屏的成功研制为提升射线图像探测水平提供了有益探索.

* 国家自然科学基金 (批准号:11275155) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: zandwnever@163.com

2 新型液闪阵列成像屏主要参数和研制简介

图 1 和表 1 分别是研制完成的新液闪阵列屏和闪烁纤维屏的实物图和主要参数。

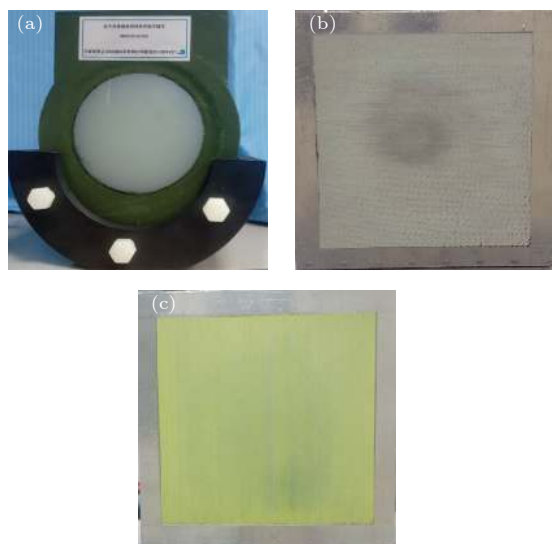


图 1 阵列成像屏实物图 (a) LCA 液闪阵列屏; (b) GSFA 纤维屏; (c) BSFA 纤维屏

Fig. 1. Array imaging plate: (a) LCA liquid scintillator capillaries array; (b) GSFA scintillating array screen; (c) BSFA scintillating array screen.

表 1 三种阵列屏的基本结构尺寸和参数

Table 1. Geometry dimension and performance parameter of three array imaging plate.

	阵列图像屏		
	GSFA	BSFA	LCA
像元尺寸/mm	0.3	0.5	0.1
中心波长/nm	492	432	426
衰减时间/ns	2.7	2.7	<3.5
厚度/mm	50	50	60
闪烁材料	BCF20	BCF10	EJ309

其中 GSFA 是采用 BCF-20 闪烁纤维排列而成的阵列屏, BSFA 为 BCF-10 闪烁纤维阵列屏, LCA 为内径是 0.1 mm、壁厚为 0.02 mm 的石英毛细管液闪阵列屏, 其毛细管中装有高发光效率 EJ309 液体闪烁体. 液闪和闪烁纤维都是有机闪烁材料, 主要的成分是碳和氢.

把内径仅 0.1 mm 的石英毛细管排成大尺寸均匀的阵列屏, 其研制、加工难度非常大, 加工过程较为复杂. 超细毛细管在拉制过程易破碎, 即使

不破碎也容易变形, 拉制过程需精确控制. 为防止破碎和形变, 加工过程中需在毛细管内鼓入适当空气并严格控制气量, 同时要采用“倒吸法”消除碎屑, 防止毛细管堵塞. 在液闪灌装之前, 要通过晶须生长法对毛细管内壁进行粗糙化处理, 实现液闪在毛细管内均匀浸润, 同时为保真阵列屏的性能稳定, 还要对毛细管壁进行去活性分子团和惰性化处理. 在灌装液闪过程中, 毛细管内容易产生气泡, 需进一步采用“微正压慢渗透”工艺进行排气. 灌装液闪后的阵列屏两端由光纤面板进行密封.

3 射线激发下阵列屏调制传递函数的理论模拟

中子或伽马射线与阵列屏中闪烁材料作用机制较为复杂. 射线的散射和所产生的次级带电粒子的能量沉积弥散, 均会造成信号在阵列间相互串扰, 致使成像屏空间分辨下降^[18,19]. 成像的射线不同, 阵列屏空间分辨响应特性也不同, 对其评估更为复杂.

调制传递函数 (modulation transfer function, MTF) 常用来表征成像系统的空间分辨特性^[20], 本文借鉴光电成像器件 MTF 的测试原理, 建立了模拟分析方法和实验研究方案, 对射线激发下的阵列成像屏开展空间分辨特性研究.

3.1 MTF 理论模拟方法

刀口边缘响应法是获得成像器件 MTF 常用的一种方法, 即先获得成像器件对刀口响应的边缘扩展函数 (edge spread function, ESF), 然后对 ESF 进行微分和傅里叶变换得到 MTF. 对离散采样阵列探测器, 为更全面评估空间分辨能力, 应用倾斜边缘刀口法^[21]. 基于该方法, 本文采用大型的射线粒子运输模拟软件 MCNPx 进行仿真模拟, 该软件对粒子运输模拟过程比较接近真实的物理过程.

本文模拟中射线源 (分别是 14 MeV 中子和 1.25 MeV 伽马) 设计为一均匀定向发射的面源, 面源的形状为矩形, 发射方向垂直于阵列屏入射面. 由于面源边沿与阵列的相对位置 (见图 2(a)–(c)) 对能量沉积分布和荧光输出分布均会有影响, 为此采用倾斜边缘刀口法, 见图 2(d) 的方式, 即面源在阵列屏上的投影边沿与阵列排布方向呈一定夹角. 夹角的设计规则是沿着倾斜的边沿, 每经过 10 个

像元, 第一个像元未被辐照, 而最后一个恰好被完全辐照, 则根据几何关系算得倾斜角度约为 6° . 模拟中各阵列屏的结构参数见表 1. 采用 MCNPx 软件中 F6 计数卡记录每根阵列单元内次级带电粒子 (电子或质子) 的能量沉积, 再根据闪烁材料对不同能量带电粒子 (电子或质子) 的光响应函数, 累计得到每个像元内产生的荧光光子数, 根据图 3 及下列的 (1) 式和 (2) 式可求得阵列成像屏的 ESF.

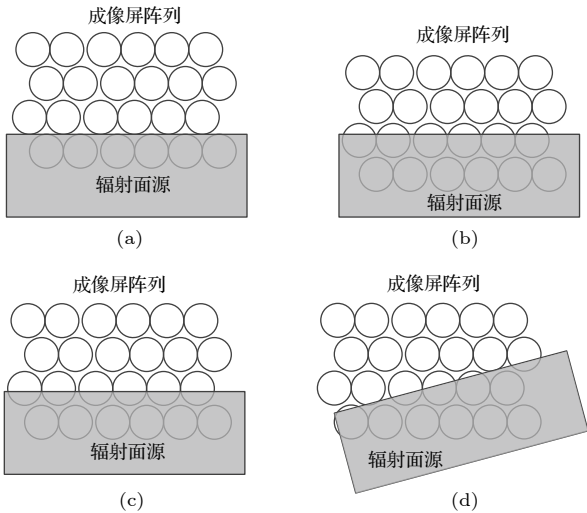


图 2 矩形面源在阵列上的投影示意图 (a) 面源投影内的阵列单元完全被辐照; (b), (c) 投影边界处的阵列单元没有被完全辐照; (d) 投影倾斜于阵列排布方向

Fig. 2. Projection sketch of surface source on the array: (a) The array cell at the boundary of projection area is fully irradiated; (b), (c) the array cell at the boundary of projection area is not fully irradiated; (d) edge of projection slants through the horizontal direction of the array.

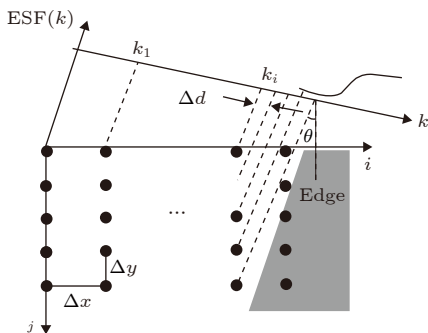


图 3 倾斜边缘扩展函数投影示意图

Fig. 3. Projection sketch of slope edge for ESF.

边缘扩展函数是沿垂直于边缘方向的投影曲线. 对于倾斜边缘, 其边缘图像与采样阵列方向存在一定夹角, 见图 3. 由图像的几何关系得到倾斜边缘的 ESF 表达式为

$$ESF(k\Delta d) = \frac{\sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} f(i\Delta x, j\Delta y) \delta(k - k_i - j)}{\sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} \delta(k - k_i - j)}, \quad (1)$$

其中, $f(i\Delta x, j\Delta y)$ 表示离散数字图像, 其大小为 $M \times N$, Δx 和 Δy 表示图像像素间的距离; $ESF(k\Delta d)$ 为倾斜边缘扩展函数; i, j 坐标是采样阵列图像坐标轴, k 表示与边缘正交坐标轴; Δd 表示沿 k 轴采样间隔, $\Delta d = \Delta y \cdot \sin \theta$, θ 为倾斜角.

根据文献 [21, 22] 方法, 可采用 (2) 式的迭代计算得到 ESF.

$$ESF^{(0)}(k) = f(0, j), \quad j = k, \quad k \in [0, N - 1],$$

$$ESF^{(i)}(k) = \begin{cases} ESF^{(i-1)}(k), & k \in [0, k_i - 1], \\ [ESF^{(i-1)}(k) + f(i, k - k_i)]/2, & k \in [k_i, k_{i-1} + N - 1], \\ f(i, k - k_i), & k \in [k_i + N - 1, k_{i-1} + N]. \end{cases} \quad (2)$$

图 4 是参考文献 [23, 24] 给出的 EJ309 对质子和电子的光响应函数曲线, 其中电子响应函数通过 ^{22}Na , ^{137}Cs , ^{60}Co 和 AmBe 源发射的伽马射线标定给出 (用伽马射线与闪烁体作用产生康普顿边缘刻度), 质子响应函数在 AmBe 源上应用飞行时间幅度谱及波形甄别技术给出.

3.2 MTF 模拟结果与分析

由 3.1 节描述的方法结合图 4 的光响应曲线, 就可以模拟给出阵列屏在射线激发下的 ESF. 图 5 是液闪阵列屏在 14 MeV 中子和 1.25 MeV 伽马激发下 ESF 下降沿的归一化光输出分布曲线. 图中以沿垂直于边缘方向依次排列的毛细管序号为横坐标, 边缘处被直照的毛细管为第 1 个像素 (pixel), 边缘外依次为第 2 个像素, 一直到第 n 个像素. 各毛细管内相对光输出为纵坐标. 从图 5 曲线上可知, 由于射线散射及产生次级粒子的能量沉积弥散, 不仅在射线直接照射的毛细管内有光输出, 在未被照射的相邻毛细管内均出现了光输出, 相距越远, 光输出越少. 对于 1.25 MeV 伽马射线, 由于其作用产生的次级电子穿透能力较强, 光输出在更远的毛细管内产生, ESF 的下降沿更缓. 对比

说明,液闪阵列屏对 14 MeV 中子空间分辨要好于 1.25 MeV 伽马射线.

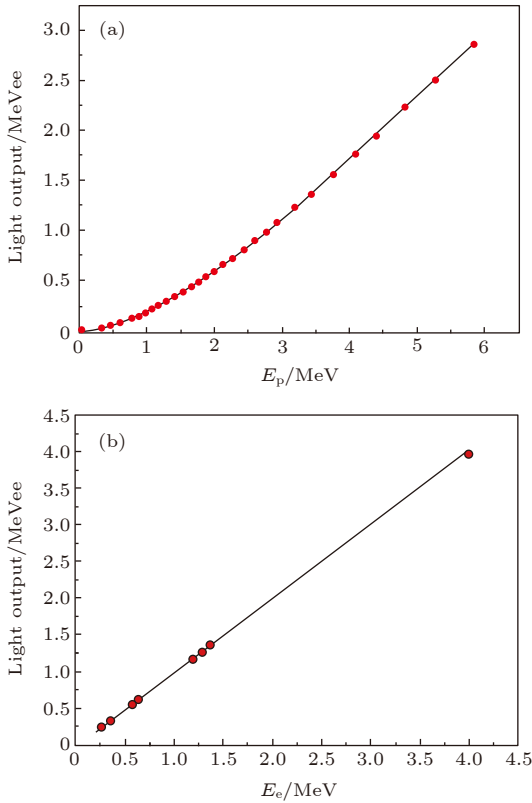


图 4 EJ309 液闪对质子和电子的光响应曲线 (1 MeVee 表示沉积 1 MeV 电子能量的输出光量;) (a) 质子光响应函数; (b) 电子光响应函数
Fig. 4. Light output of EJ309 as a function of energy for particle energy: (a) Light output as a function proton energy; (b) light output as a function electron energy.

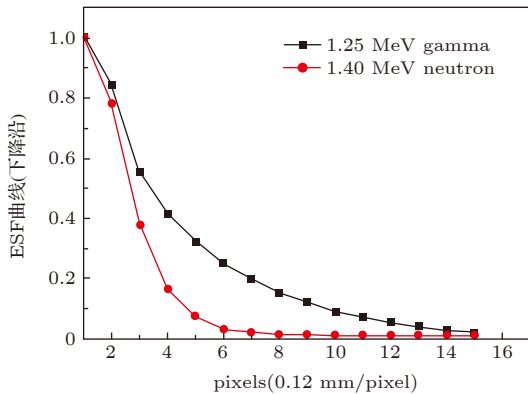


图 5 模拟的液闪阵列屏 ESF 下降沿归一化曲线
Fig. 5. Normalized curves of falling edge of ESF for liquid scintillator array by simulation.

采用上述模拟方法,分别对液闪阵列屏和闪烁纤维阵列屏开展了 MTF 理论模拟. 图 6 是模拟的结果,标注 SFA 的是闪烁纤维阵列屏,标注 LCA

的是液闪毛细管阵列屏. 从图 6 可知,不论是对中子还是对伽马射线,随着闪烁纤维直径的减小,空间分辨能力改善. 对于 14 MeV 中子,闪烁纤维直径由 0.5 mm 降低到 0.1 mm,在 MTF 值为 0.1 处,空间分辨从 0.9 lp·mm⁻¹ 提高到了 1.4 lp·mm⁻¹,而 0.1 mm 直径毛细管的液闪阵列屏空间分辨达到 1.8 lp·mm⁻¹; 对于 1.25 MeV 伽马,闪烁纤维直径由 0.5 mm 降低到 0.1 mm,在 MTF 值为 0.1 处,空间分辨从不足 0.5 lp·mm⁻¹ 提高到近 0.7 lp·mm⁻¹,而液闪阵列屏达到 0.9 lp·mm⁻¹,仍优于闪烁纤维屏.

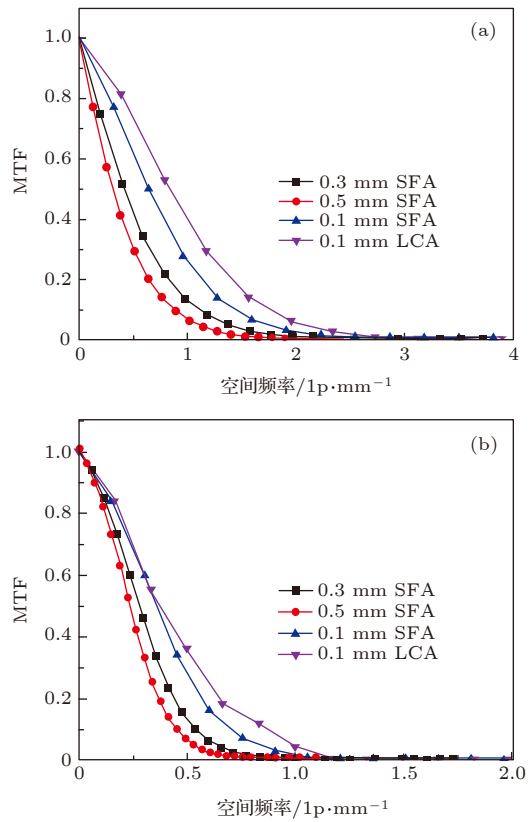


图 6 新型液闪阵列屏与闪烁纤维屏的 MTF 理论模拟曲线 (a) 14 MeV 中子激发下的 MTF 曲线; (b) 1.25 MeV 伽马激发下的 MTF 曲线
Fig. 6. MTF curves of the liquid scintillator capillary array and scintillating fiber array by simulation: (a) MTF curves of the three array image plates with 14 MeV neutron irradiation; (b) MTF curves of the three array image plates with 1.25 MeV Gamma irradiation.

由射线与物质的作用机制可知,石英材料对质子阻止能力优于有机材料,而且毛细管壁的厚度大于闪烁纤维的包层,相比闪烁纤维阵列,质子在石英阵列内串扰更小,能量沉积弥散更小,空间分辨性能更好. 但对于射程较长的电子来说,两种包层

材料对电子阻止作用相差并不大,因此相同像元尺寸的纤维阵列屏和液闪阵列屏,对 1.25 MeV 伽马射线的空间分辨差异没有对 14 MeV 中子的差异大(见图 6(a)和图 6(b)对比),模拟结果符合理论预期.

4 新型阵列成像屏 MTF 实验比对研究

在 4000 居里的 ^{60}Co 伽马源装置上,分别对新型液闪阵列屏和像元直径为 0.3 和 0.5 mm 的国产闪烁纤维阵列屏开展了 MTF 实验研究. ^{60}Co 伽马射线源发射平均能量为 1.25 MeV 的伽马光子,源区直径为 20 mm. 为降低源区几何尺寸对 MTF 测试结果的影响,闪烁屏距源区应尽量远,综合考虑源强和测试系统灵敏度,设计闪烁屏距源为 3 m. 由于伽马射线强的穿透能力,常用于测量可见光光学器件 MTF 的薄刀口已不适用,必须选用具有一定厚度的刀口,通常做法是用厚块状材料的某一面作为刀口边缘,而且选取的材料对伽马射线要具有高的衰减能力,以获得高对比度的边缘扩展函数图像. 对 1.25 MeV 伽马射线,5 cm 厚的钨可衰减近 2 个量级. 为此,实验中选用 5 cm 厚钨块,取某一面作为刀口边缘,为降低边缘准直误差对测量的影响,该面设计为具有 0.1 rad 弧度的曲面. 实验时钨刀口紧贴闪烁阵列屏,其边缘与阵列排布方向有一定夹角,类似于模拟的设计. 图像上边缘与阵列方向实际的夹角通过 Hough 变换的方法求得. 用电荷耦合器件(charge-coupled device, CCD)相机进行图像采集,CCD 相机上一个像素对应阵列成像屏的区域为 $70\ \mu\text{m} \times 70\ \mu\text{m}$,小于阵列单元的尺寸. 图 7 是实验布局示意图.

首先对阵列屏的均匀性进行测量,均匀性不仅是衡量成像屏质量的重要参数,也是图像数据处理中灰度校正需要标定的参数,经过成像屏均匀性校准才能得到更准确的数据,即所谓图像的平场响应校准. 测点处射线的空间分布均匀性和相机系统的成像均匀性好于 97%. 图 8(a)—(c) 分别是液闪阵列屏和其他两种屏均匀性的实测结果. 直观地从图像灰度分布看,液闪阵列屏均匀性明显好于闪烁纤维屏.

图 9(a)—(c) 分别是在伽马射线源上实测的液闪阵列屏和两种闪烁纤维阵列屏的 MTF 曲线,对

比可见,液闪阵列有更好的空间分辨,在 MTF 值为 0.1 处,液闪阵列的空间分辨接近 $0.9\ \text{lp}\cdot\text{mm}^{-1}$,像元 0.3 和 0.5 mm 的闪烁纤维阵列空间分辨均没有超过 $0.5\ \text{lp}\cdot\text{mm}^{-1}$. 由图 9 所示实验和理论模拟结果可看出,模拟得到曲线和实验测量曲线基本一致,实验测得的 MTF 曲线值较理论模拟的略小,这可能是由于实际的射线源并非理想的点源,受到源几何尺寸的影响.

国内现有的 14 MeV 中子源强度都较低,比文中所用的钴源强度低近 2 个量级,还不能满足阵列屏对 14 MeV 中子的 MTF 测量,通过伽马射线的

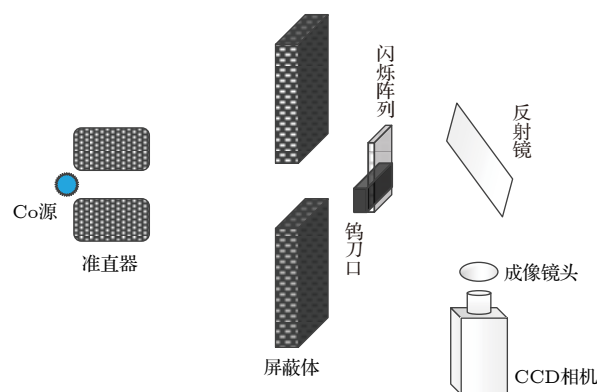


图 7 成像屏调制传递函数测量布局示意图

Fig. 7. Experimental setup sketch for MTF measurement.

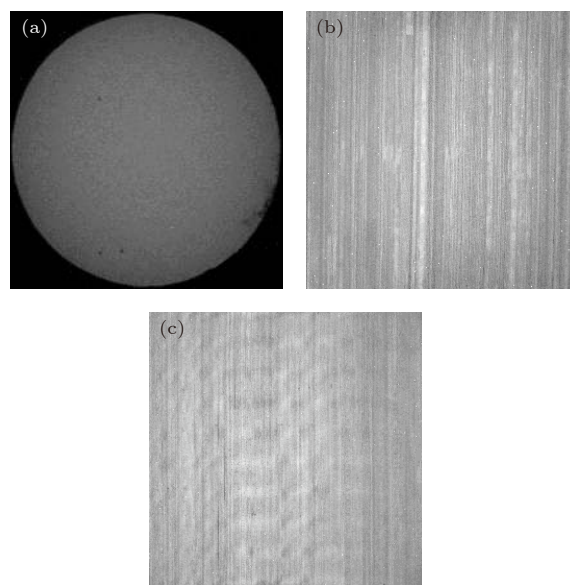


图 8 三种成像屏均匀性的实测结果 (a) LCA 液闪阵列; (b) GSFA 纤维阵列屏; (c) BSFA 纤维阵列屏

Fig. 8. Luminescent uniformity of the three array image plates by measurement: (a) LCA liquid scintillator capillaries array; (b) GSFA scintillating fiber array; (c) BSFA scintillating fiber array.

实验研究表明上述理论模拟方法是可行的, 模拟结果也是可信的. 故通过理论模拟得到的阵列屏对 14 MeV 中子的 MTF 曲线, 可以用来表征其实际的空间分辨特性.

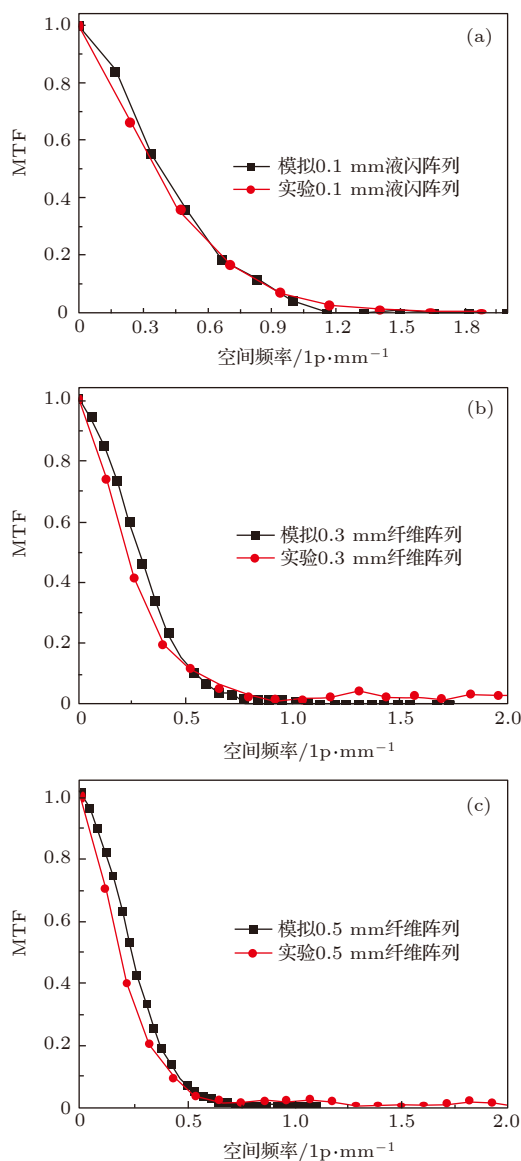


图 9 阵列屏对 1.25 MeV 伽马射线的 MTF 实测与模拟结果 (a) LCA 液闪阵列屏; (b) GSFA 闪烁纤维阵列屏; (c) BSFA 闪烁纤维阵列屏

Fig. 9. Comparison of MTF curves measured and simulated for the three array image plates under 1.25 MeV Gamma ray: (a) LCA liquid scintillator capillaries array; (b) GSFA scintillating fiber array; (c) BSFA scintillating fiber array.

5 总结

为探究所研制的新型液闪阵列屏的成像空间分辨特性, 本文建立了基于倾斜边缘刀口响应的模

拟和实验测试方法, 理论模拟研究了液闪阵列屏与几种常规闪烁纤维阵列屏对 14 MeV 中子和 1.25 MeV 伽马空间调制传递函数, 并在 1.25 MeV 伽马源上进行了实验测量验证. 实验和理论结果表明: 所研制的 0.1 mm 液闪毛细管阵列具有更优的空间分辨特性, 对 1.25 MeV 伽马射线, 空间分辨可达到 0.9 lp/mm (MTF 值为 0.1, 实测值), 对 14 MeV 中子, 空间分辨可达到 1.8 lp/mm (MTF 值为 0.1, 理论值), 并且实测得液闪阵列屏具有更好的成像均匀性; 且实测曲线和理论模拟曲线较为一致, 证实了理论模拟可靠性. 所研制的新型的液闪阵列可有效提高图像质量, 为高效率和高空间分辨的射线成像探测提供了有益尝试. 从实验中发现, 由于射线源几何尺寸影响, 测试得到 MTF 曲线比理论略低. 今后将进一步研制大面积液闪阵列屏并研究更准确的空间分辨测试方法, 同时进一步研究中子源的测试方法.

感谢合肥正阳光电科技有限公司刘杰为液闪阵列屏研制所给予的帮助, 感谢西北核技术研究院马燕助理研究员给予实验上的支持.

参考文献

- [1] Ress D, Lerche R A, Ellis R J, Heaton G W, Lehr E 1995 *Rev. Sci. Instrum.* **66** 4943
- [2] Disdier L, Lerche R A, Bourgade J L, Glebov V Y 2004 *Rev. Sci. Instrum.* **75** 2134
- [3] Caillaud T, Landoas O, Briat M, Rossé B, Thfoin I, Philippe F, Casner A, Bourgade J L, Disdier L, Glebov V Y, Marshall F J 2012 *Rev. Sci. Instrum.* **83** 10E131
- [4] Disdier L, Rouyer A, Wilson D C, Fedotoff A, Stoeckl C, Bourgade J L, Glebov V Y, Garconnet J P, Seka W 2002 *Nucl. Instrum. Meth. A* **489** 496
- [5] Klir D, Shishlov A V, Kokshenev V A, Kubes P, Labetsky A Y, Rezac K, Cikhardt J, Fursov F I, Kovalchuk B M, Kravarik J, Kurmaev N E, Ratakhin N A, Sila O, Stodulka J 2013 *Plasma Phys. Controlled Fusion* **55** 85012
- [6] Zhang F Q, Li Z H, Yang J L, Ye F, Wang Z, Xia G, Ying C T, Liu G J 2007 *Sci. Chin. Tech. Sci.* **37** 569 (in Chinese) [章法强, 李正宏, 杨建伦, 叶凡, 王真, 夏广新, 应纯同, 刘广均 2007 *中国科学: 技术科学* **37** 569]
- [7] Melek Z 2015 *Ph. D. Dissertation* (Australia Wollongong: University of Wollongong)
- [8] 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]
- [9] Ma J M, Wang K L, Song G Z, Zhang J Q, Wang Q S 2011 *Nuclear Electronics & Detection Technology* **31** 473 (in Chinese) [马继明, 王奎禄, 宋顾周, 张建奇, 王群书 2011 *核电子学与探测技术* **31** 473]
- [10] Yao Z M, Duan B J, Song G Z, Yan W P, Ma J M, Han C C,

- Song Y 2017 *Acta Phys. Sin.* **66** 062401 (in Chinese) [姚志明, 段宝军, 宋顾周, 严维鹏, 马继明, 韩长材, 宋岩 2017 物理学报 **66** 062401]
- [11] Daniel A L, Camille B, Gary P G, Bradford H B, Brian W M, David F, Lars R F 2011 *SPIE Int. Soc. Opt. Eng.* **8144** 814407
- [12] Thfoin I, Landoas O, Caillaud T, Disdier L, Bourgade J L, Rosse B, Sangster T C, Glebov V Y 2009 *ANIMMA First International Conference on Advancements in Nuclear Instrumentation, Measurement Methods and their Applications New York, United States, June 7–10, 2009* p1
- [13] Daniel A L, Bradford H B, Gary P G 2014 *Proceedings Volume 9211, Target Diagnostics Physics and Engineering for Inertial Confinement Fusion III 921105* San Diego, California, United States, September 23, 2014 p1
- [14] Simpson R, Cutler T E, Danly C R, Espy M A, Goglio J H, Hunter J F, Madden A C, Mayo D R, Merrill F E, Nelson R O, Swift A L, Wilde C H R 2016 *Rev. Sci. Instrum.* **87** 11D830-1
- [15] Merrill F E, Bower D, Buckles R, Clark D D, Danly C R, Drury O B, Dzenitis J M, Fatherley V E 2012 *Rev. Sci. Instrum.* **83** 10D317-1
- [16] Grim G P, Day R D, Clark D D, Fatherley V E, Finch J P, Garcia F P, Jaramillo S A, Montoya A J, Morgan G L Oertel J A, Ortiz T A, Payton J R, Pazuchanics P D, Schmidt D W, Valdez A C, Wilde C H, Wilke M D 2007 *Proceedings Volume 6707, Penetrating Radiation Systems and Applications V III 67070 H* San Diego, California, United States, September 28, 2007 p1
- [17] Zhang F N 2016 *Ph. D. Dissertation* (Xi'an: Xi'an Jiao Tong University) (in Chinese) [张凤娜 2016 博士学位论文 (西安: 西安交通大学)]
- [18] Danly C R, Sjue S, Wilde C H, Merrill F E, Haight R C 2014 *Rev. Sci. Instrum.* **85** 11E607
- [19] Jia Q G, Hu H S, Zhang F N, Zhang T K, Wei L, Zhan Y P, Liu Z H 2013 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **60** 4727
- [20] Christopher D C, Richard C S 2008 *J. Opt. Soc. Am. A* **25** 159
- [21] Wang P W 2013 *M. S. Thesis* (Xi'an: Northwest Institute of Nuclear Technology) (in Chinese) [王培伟 2003 硕士学位论文 (西安: 西北核技术研究所)]
- [22] Cao X H, Huang H K, Lou L 2000 *Proceedings 3977, Medical Imaging 2000: Physics of Medical Imaging* San Diego, CA, United States, April 25, 2000 p580
- [23] Bai H Y, Wang Z M, Zhang LY, Lu Y, Jiang H Y, Chen J X, Zhang G H 2017 *Nucl. Instrum. Meth. A* **863** 47
- [24] Pino F, Stevanato L, Cester D, Nebbia G, Bohus L S, Viesti G 2014 *Appl. Radiat. Isot.* **89** 79

Spatial resolution of novel liquid scintillating capillary array*

Zhang Mei[†] Li Kui-Nian Li Yang Sheng Liang Zhang Yan-Hong

(*State Key Laboratory of Intense Pulsed Radiation Simulation and Effect, Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China*)

(Received 10 October 2019; revised manuscript received 29 November 2019)

Abstract

Scintillating array image plates are allowed high resolution through a thicker detector which increases quantum efficiency without degrading the imaging resolution substantially. Due to limitations imposed by process capability, scintillator fiber array with pixel diameter less than 0.2 mm is hardly manufactured to improve performance. Therefore, a liquid scintillator capillary array with 0.1 mm pixel is developed to improve the detection efficiency and spatial resolution of image plate for low intensity radiation imaging. Its performances are studied and tested by simulation and experiment, and are compared with those of scintillating fiber array. Especially in order to gain high fidelity representation of modulation transfer function of the array image plate, a method of simulating and measuring the slanted knife edge response and an iterative algorithm are introduced. For 14 MeV neutron and 1.25 MeV gamma, the slanted knife edge responses of these array image plates with pixel dimensions in a range from 0.1 mm to 0.5 mm are respectively simulated by MCNPx program and the modulation transfer function (MTF) are obtained. The simulation results show that compared with scintillating fiber array, the liquid scintillator capillaries array has an obvious merit in spatial resolution because of greater stopping power for secondary charged particle in the capillary quartz glass wall with 0.02 mm in thickness. Its ultimate resolution can reach to 1.8 lp/mm for 14 MeV neutron by simulation. At the 4000 Ci ⁶⁰Co facility, a 5-cm-thick tungsten bar, one side of which has a curvature of 0.1 radian to minimize the misalignment effect, is made a knife edge. The MTF of the scintillating fiber array with 0.3 mm and 0.5 mm pixel and newly developed liquid scintillator capillary array is measured through this tungsten knife edge. Experimental measurement results have also verified that the liquid scintillator capillary array performs well in spatial resolution and luminescent uniformity for 1.25 MeV gamma. The ultimate spatial resolution, 0.9 lp/mm is gained, and those of other scintillating fiber arrays are all less than 0.5 lp/mm. Moreover, experimental test validates the simulating method and simulated results, although the measured value is slight less than the simulated value because of the effect of dimension of ⁶⁰Co source.

Keywords: novel liquid scintillator capillary array, sloping edge spread function, modulation transfer function, radiation imaging

PACS: 28.20.Pr, 29.40.Mc

DOI: 10.7498/aps.69.20191545

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 11275155).

† Corresponding author. E-mail: zandwnever@163.com