



脉冲射线束成像关键技术

盛亮^{1,2*}, 黑东炜^{1,2}

1. 强脉冲辐射环境模拟与效应全国重点实验室, 西安 710024;

2. 西北核技术研究所, 西安 710024

*联系人, E-mail: shengliang@nint.ac.cn

收稿日期: 2022-12-20; 接受日期: 2023-02-08; 网络出版日期: 2023-06-14

卓越青年基金(编号: JQZQ021901)资助项目

摘要 脉冲射线束成像是研究惯性约束聚变等核反应装置性能的核心测量技术之一, 测量对象为MeV中子、伽马射线束, 时间尺度从ns到 μ s, 空间尺度从亚mm到10 cm. 本文介绍了西北核技术研究所近年来在发展脉冲射线束成像技术、研制成像系统所取得的主要进展. 设计了非对顶双截锥大视场厚针孔和高探测效率编码孔, 发展了大面积图像转换屏和阵列式中子图像转换屏, 研究了MeV中子、伽马射线束图像转换屏的基本性能, 提出了选通型像增强器基本设计要求, 系统研究了快响应像增强器的时间选通特性和空间分辨特性, 基于一种特殊的全局快门驱动时序设计, 研发了百ns曝光双帧CMOS相机, 研制了一种针对百ns时间尺度射线源的触发与时间关联系统, 包括触发探测器、定时探测器、同步机和快门发生器等, 与射线源特征时间关联精度一般为3–5 ns. 对超快时间分辨、超高空间分辨、高维成像等脉冲射线束成像技术发展方向进行了讨论.

关键词 中子/伽马成像, 脉冲射线束, 核反应, 惯性约束聚变

PACS: 28.20.Pr, 52.59.-f, 25.70.Jj, 52.57.-z

1 引言

脉冲射线束测量技术是辐射探测学科的一个特殊分支, 在20世纪中期主要受热核武器试验物理诊断需求驱动, 其研究对象为热核试验中产生的中子、伽马、X光等各类射线束, 研究内容包括各种射线束强度时间谱、能谱、空间分布参数的诊断方法和技术, 主要目的为诊断热核装置性能、校验物理设计, 与放射化学诊断方法相比, 测量结果具有实时性, 被称之为“实时物理测量技术”, 由于探测系统靠近试验装置,

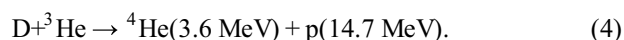
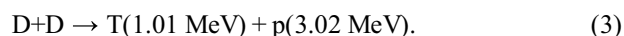
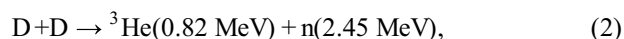
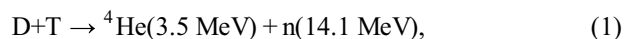
又称之为“近区物理测量技术”^[1,2].

吕敏院士、王奎禄研究员在20世纪70年代指出, 中子、伽马在核装置内部经过输运发生各种核反应后的剩余直穿部分能够反映核反应区二维特性, 由于中子、伽马都为深穿透射线, 需经过长度为中子、伽马自由程10倍以上的厚针孔准直, 由于伽马射线无法穿透大质量厚度装置, 测点伽马射线空间分布反映的是核反应区外边界压缩形状, 而中子穿透能力较强, 内部中子可以穿透大质量厚度装置, 测点中子空间分布可反映核反应区内部结构, 这些实验结果对于校验核

引用格式: 盛亮, 黑东炜. 脉冲射线束成像关键技术. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2023, 53: 272007

Sheng L, Hei D W. Key technologies of pulsed radiation beam imaging (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2023, 53: 272007, doi: 10.1360/SSPMA-2022-0478

装置物理设计与数值模拟程序至关重要, 时至今日国内外热核试验中子、伽马图像诊断结果仍未见公布. 禁核试之后, 脉冲射线束测量对象转变为大型核科学实验中核反应参数诊断, 比较典型的为美国利弗莫尔国家实验室NIF (National Ignition Facility)装置ICF (Inertial Confinement Fusion)实验^[3,4]和圣地亚实验室Z装置上开展的MagLIF (Magnetized Liner Inertial Fusion)实验^[5], 一次实验都配备了大量的核测试诊断设备开展热核反应物理研究工作. 当前NIF装置的DT中子产额 $>10^{16}$ n^[6,7], 使得核测试诊断系统能够以更高的分辨能力提供辐射源空间、时间、能谱等方面的信息. 此外在实验室中能够用以天计的准备时间进行重复实验, 所获得物理信息的丰富程度要显著高于热核试验, 实验室一般采用冷冻氘氟作为燃料, 其主要核反应为



在ICF实验中, 中子能量分布受核反应区温度、氘氟离子自身动能、中子与周围物质相互作用等因素的影响, 在DT聚变峰之外的低能区域存在较强的散射中子分布, 比14.1 MeV峰值强度低1–2个量级^[8]. 不同能量中子图像所反映的物理过程是不同的. 例如, 以DT为燃料的聚变反应中, 14.1 MeV初级聚变中子主要反映的是DT燃料区分布, 而通过测量6–10 MeV散射中子和初级中子的比值可以给出燃烧区的面密度 ρ_R . 在核燃料周围一般还存在烧蚀层, 用来整型压缩核燃料的冲击波, 核反应产生的中子与烧蚀层中的C元素发生非弹相互作用, 所产生的4.44 MeV伽马射线空间分布可以用来诊断烧蚀层状态.

从当前数值模拟结果看, 如果不考虑二维、三维效应, 所预测的中子产额比实验结果高, 这导致了高能量密度物理学界早期对利用激光或Z箍缩驱动实现惯性约束聚变点火的估计过于乐观. 这说明反应区的二维分布甚至三维分布对于校验数值模拟程序的重要性, 由于带电粒子很难穿出反应区, 通常测量中性不带电的中子、伽马射线束特征来反映核反应区空间、密度、温度分布信息, 对于低质量厚度的ICF聚变靶也可以用(D, ${}^3\text{He}$)反应产生的质子作为聚变区特征诊断

探针^[9].

聚变燃烧区空间分布是所有点火物理过程最终状态的直接反映, 燃烧区空间分布实验测量结果对于评估点火成败具有重要意义, 因此脉冲射线束成像是靶物理核诊断中的核心方法之一.

所测量对象为单次脉冲, 在曝光时间内、单个像素面积上测量的是粒子集体统计行为, 探测单元工作在电流探测模式, 在成像通道上除了厚针孔或编码孔之外, 还设置了多道准直结构, 以防止其他散射射线的影响, 从测点看过去, 就像一束脉冲射线照射过来, 所以将测量对象用脉冲射线束来描述. 其时间特征尺度一般为ns到 μs , 空间特征尺度一般为亚mm到10 cm. 西北核技术研究所从事脉冲射线束成像技术研究的项目团队一直致力于该领域的研究工作, 在厚针孔或编码孔、射线图像转换屏、时间选通器件、高性能图像记录等关键技术领域开展了有特色的研究工作, 本文对近年来所取得的研究进展进行较为系统的介绍.

2 脉冲射线束成像关键技术

脉冲射线束成像系统基于针孔成像和闪烁探测原理, 主要由厚针孔或编码孔、射线图像转换屏、时间选通型像增强器、CCD或CMOS相机等关键器件构成, 如图1所示. Anger^[10]于1952年建立了基于厚针孔成像的伽马射线(Iodine-131, 0.36 MeV)成像系统, 是现代医学射线成像技术发展的重要里程碑, 也是现代脉冲射线束成像系统设计的重要参考原型.

如图1所示的脉冲射线束成像系统为典型的时间、空间、能量移变系统, 厚针孔或编码孔的点扩散函数为空变点扩散函数, 即针对源不同位置的空间分辨是不一样的^[11,12]; 闪烁体的点扩散函数除了与闪烁体材料、厚度等自身参数有关, 还与射线种类和能量有关^[13]; 时间选通型像增强器的显著特点为空间分辨受所加选通脉冲时间行为的影响^[14,15]; 图像记录系统通常为CCD或CMOS相机, 其空间分辨与像素尺寸和填充比有关. 成像系统的时间分辨由图像转换屏的时间响应特性和时间选通脉冲宽度决定. 脉冲射线束成像系统性能评价多采用探测量子效率(Detective Quantum Efficiency, DQE)和噪声传递理论, 减少成像环节、在图像模糊环节前增加高增益环节、提高成像放大倍数都可以改善脉冲射线束成像系统性能^[16], 其中

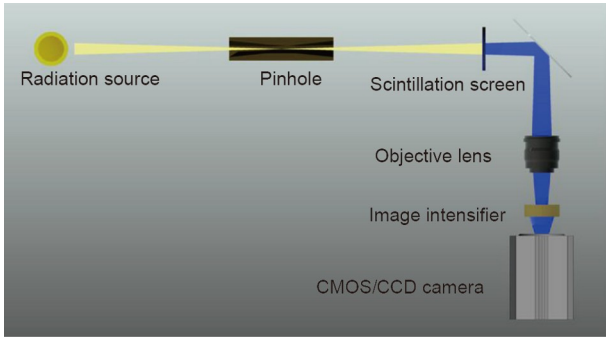


图 1 (网络版彩图)脉冲射线束成像系统示意图

Figure 1 (Color online) Schematic diagram of pulsed radiation beam imaging system.

成像系统探测量子效率定义为不同空间分辨率 f 下的输出信噪比与输入信噪比平方的比值:

$$\text{DQE}(f) = \frac{\text{SNR}_o^2(f)}{\text{SNR}_i^2(f)}. \quad (5)$$

2.1 厚针孔与编码孔

基于探测量子效率分析, 厚针孔的量子效率与量子散射是影响脉冲射线束成像系统性能的主要因素之一^[17]. 厚针孔一般由直孔段和两段锥孔段构成, 称之为船底型厚针孔. 针孔材料多选用金、钨等高原子序数、高密度金属材料^[18,19]. 钨金属对 1.25 MeV 伽马射线和 14 MeV 中子的线衰减系数分别为 0.1 和 0.034 mm⁻¹, 由于针孔视场限定的立体角很小, 在厚针孔总长度 > 10 倍自由程条件下, 中子或伽马经过针孔材料的散射之后进入视场范围内的概率很小, 散射强度一般低于直穿强度的 1%.

在脉冲射线束成像的系统中的厚针孔常采用对顶锥设计, 这种设计在较大视场条件下, 视场边缘管道因子下降很快, 其中管道因子定义为均匀面源条件下厚针孔像面上非中心点与中心点强度比值. 我们设计了一种新的大视场成像条件(>Φ100 mm)的厚针孔, 厚针孔直孔段两端的锥孔段采用对称但非对顶结构设计, 可以较好地兼顾视场、探测效率、空间分辨等参数要求^[20]. 典型的大视场厚针孔结构如图 2 所示, 图中 L_T 为针孔总长度, d 为直孔段孔径, L_p 为针孔直孔段长度, D_s 和 D_i 分别为物面和像面尺寸, L_s 和 L_i 分别为厚针孔中心与物面和像面距离, 具体尺寸如表 1 所示, 厚针孔的空间分辨率可以近似为

$$R_s = d \left(1 + \frac{1}{M} \right), \quad (6)$$

式中, M 为厚针孔成像放大倍数, NIF 装置的小视场测量对象厚针孔的基本设计方法是一样的, 与大视场测量对象不同之处在于, 厚针孔距离射线源较近、准直对心精度要求较高, 采取高放大倍数成像设计, 可以提高厚针孔成像系统空间分辨率. 受限于射线产额和极细厚针孔加工技术, NIF 装置厚针孔直径 (~10 μm 量级) 与测量对象特征尺寸的比只有 ~1/10 量级^[21], 需要利用图像复原算法进行图像处理^[22]来获得图像细节.

厚针孔视场锥角 θ 由下式确定, 决定了厚针孔的视场:

$$\tan \frac{\theta}{2} = \frac{D}{2\delta + L_T}. \quad (7)$$

采用理想薄针孔模型对中心点探测效率估计为

$$\eta_p = \frac{1}{16} \frac{d^2}{L_s^2}. \quad (8)$$

对于无直孔段的刀口型厚针孔其等效直径可以用式(9)来表示, 其中前两项为 Anger 等效孔径近似表达式^[23,24]:

$$d_{eA}^2 = d^2 + 2du^{-1} \tan \left(\frac{\theta}{2} \right) + 2\mu^{-2} \tan^2 \left(\frac{\theta}{2} \right). \quad (9)$$

考虑直孔段长度, 船底型厚针孔中心点等效直径 d_e 可以写成^[20]:

$$d_e^2 = \left[d' + L_p \tan^2 \left(\frac{\theta}{2} \right) \right]^2 + 2 \exp(-\mu L_p) \times \left[d' \mu^{-1} \tan \left(\frac{\theta}{2} \right) + (1 + \mu L_p) \mu^{-2} \tan^2 \left(\frac{\theta}{2} \right) \right]. \quad (10)$$

在表 1 厚针孔结构参数下 $d' = 0.6875d$. 表 2 为在物像距均为 20 m, 利用式(8)–(10)估计的视场中心位置探测效率与蒙特卡罗模拟计算结果对比.

式(8)未考虑射线穿透效应, 在表 1 结构参数下, 对于穿透能力较弱的 1.25 MeV 伽马射线估计结果与蒙特卡罗模拟计算结果接近, 对于穿透能力较强的 14 MeV 中子式(8)估计结果偏低, 采用式(9)的估计结果较模拟结果偏大, 式(10)估计结果与蒙卡模拟结果较为接近, 可以用来快速估计厚针孔探测效率.

厚针孔空变成像特性, 主要体现在两个方面: 一是在均匀辐射场条件下, 厚针孔像面上的强度随着与中

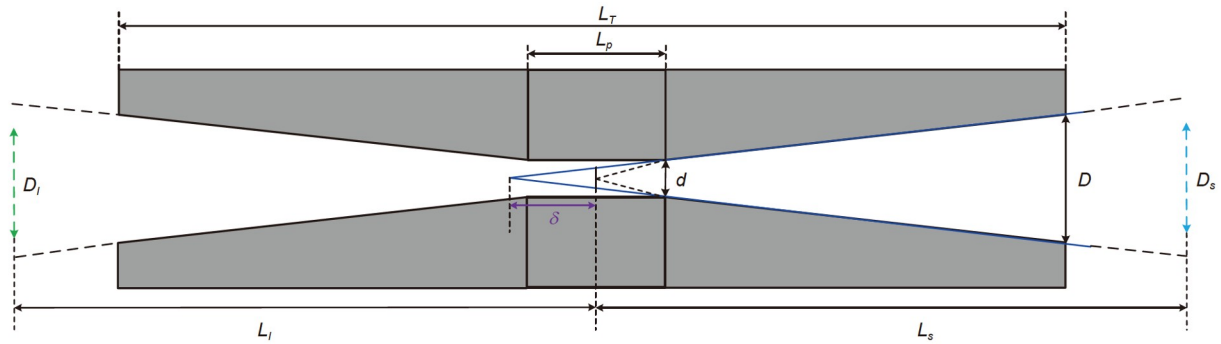


图 2 (网络版彩图)典型的大视场非对顶厚针孔结构设计示意图

Figure 2 (Color online) The typical structure of non-opposing vertexes thick pinhole with large FOV (Field of View).

表 1 厚针孔的结构参数

Table 1 Structural parameters of thick pinhole

直孔段结构参数	设定值	锥孔段结构参数	设定值
直孔段孔径 d	0.2 mm	锥孔段外孔径 D	2.325 mm
直孔段厚度 L_p	20 mm	总厚度 L_T	700 mm
直孔段锥角	1/50	锥孔段锥角	1/160
直孔段中心	0 mm	锥孔段顶点中心距 δ	22 mm

表 2 不同厚针孔直径估计下的中心位置探测效率与蒙特卡罗计算结果对比

Table 2 Detection efficiency of the position at FOV center with different estimation methods of pinhole diameter compared with the Monte Carlo calculation results

射线类型	蒙特卡罗计算	理想薄针孔直径 d	Anger等效厚针孔直径 d_{eA}	船底型厚针孔直径 d_e
14 MeV中子探测效率	1.03×10^{-11}	6.25×10^{-12}	1.46×10^{-11}	1.05×10^{-11}
1.25 MeV伽马探测效率	6.55×10^{-12}	6.25×10^{-12}	8.51×10^{-12}	6.56×10^{-12}

心点距离的增大而降低,如图3所示;二是厚针孔的点扩散函数在不同位置上不同,通常边缘位置的空间分辨率要高于中心位置,如图4所示。

在 $\Phi 100$ mm视场范围内,物像距为20 m, 14 MeV中子入射表1结构参数厚针孔管道因子大于0.6, 1.25 MeV伽马入射,管道因子大于0.7。在MTF=0.1时,中心位置14 MeV中子空间分辨率约为2.2 lp/mm, 1.25 MeV伽马空间分辨率约为2.7 lp/mm。

在较低产额射线源成像中,可采用半影孔、随机编码孔、环形编码孔等方式提高探测效率,这类成像方法无法直接获得射线束的空间分布,必须与图像复原算法相结合来获得空间分布^[25-29]。当前三种主要编码孔设计方式下,半影孔成像的有效信息在边缘半影区内,中间部分会形成强本底;随机编码孔的自相关

函数中心不是独立尖峰,存在多种不同成分干扰;环形编码孔可以有效抑制背景散射,且其自相关峰较为集中,是一种较为理想的面向低强度射线源成像的高探测效率编码孔^[30],环形编码成像过程如图5所示。

理想环形编码孔探测效率近似为 $\eta_r \approx \frac{1}{2} \frac{rd_r}{L_s^2}$, 探测

效率是相同孔径、相同物距针孔的 $8r/d$ 倍,比较图2和5可知,与厚针孔成像相比,环形编码孔成像所用的图像转换屏面积较大。在实验室利用环形编码孔对X射线源焦斑形状进行了测量,实验中X射线源管电压为40 kV,管电流为40 mA,靶前加铝片过滤低能X射线,环孔放置于距靶面1 m处。图6(a)为0.2 mm厚针孔测量结果, (b)为0.2 mm宽、环直径5 cm的环形编码孔测量结果, (c)为环形编码孔RL (Richardson Lucy)算法重建

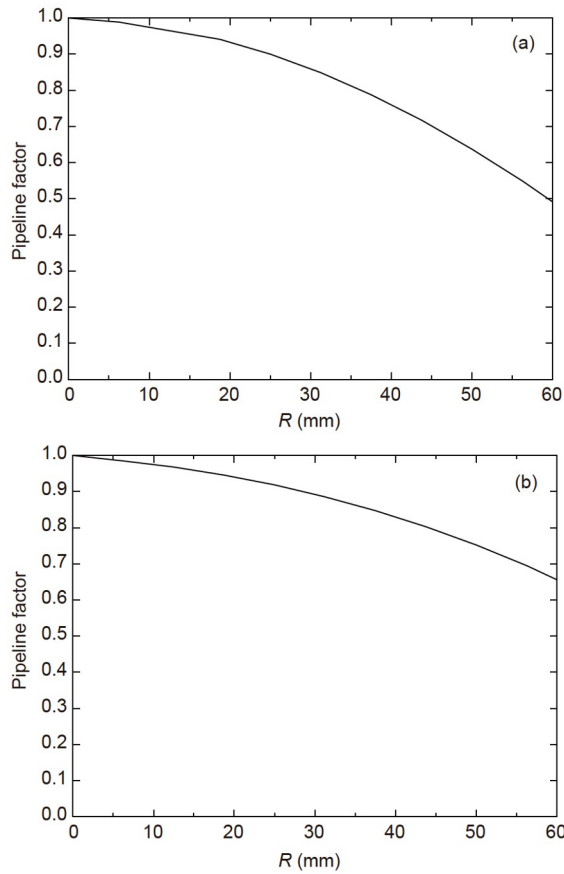


图 3 不同射线类型厚针孔管道因子与像面中心点距离 R 之间的变化. (a) 14 MeV中子入射; (b) 1.25 MeV伽马入射

Figure 3 The pipeline factors with different types of incident particles vs. the distance R between imaging plane point and center point. (a) 14 MeV neutron incidence; (b) 1.25 MeV gamma ray incidence.

结果^[31]. 实验结果表明, 0.2 mm直径针孔探测效率低无法获得辐射源图像, 环形编码孔具有较高探测效率, 重建结果清楚地反映了X射线源焦斑结构特征, 近似呈“马鞍状”, 中间强度弱, 两边强度高, 根据图像尺寸关系, X射线焦斑尺寸长度约13 mm、宽5 mm.

2.2 射线图像转换屏

图像转换屏将厚针孔或编码孔像面上形成的射线图像转换为可见光图像, 通常使用有机闪烁体作为中子图像转换屏, 无机闪烁体作为伽马射线图像转换屏. 中子通过与H/C的弹性散射产生反冲核, 反冲核将分子能级激发至高能级状态; 伽马射线通过光电效应、康普顿效应、电子对效应等产生电子, 这些电子可以

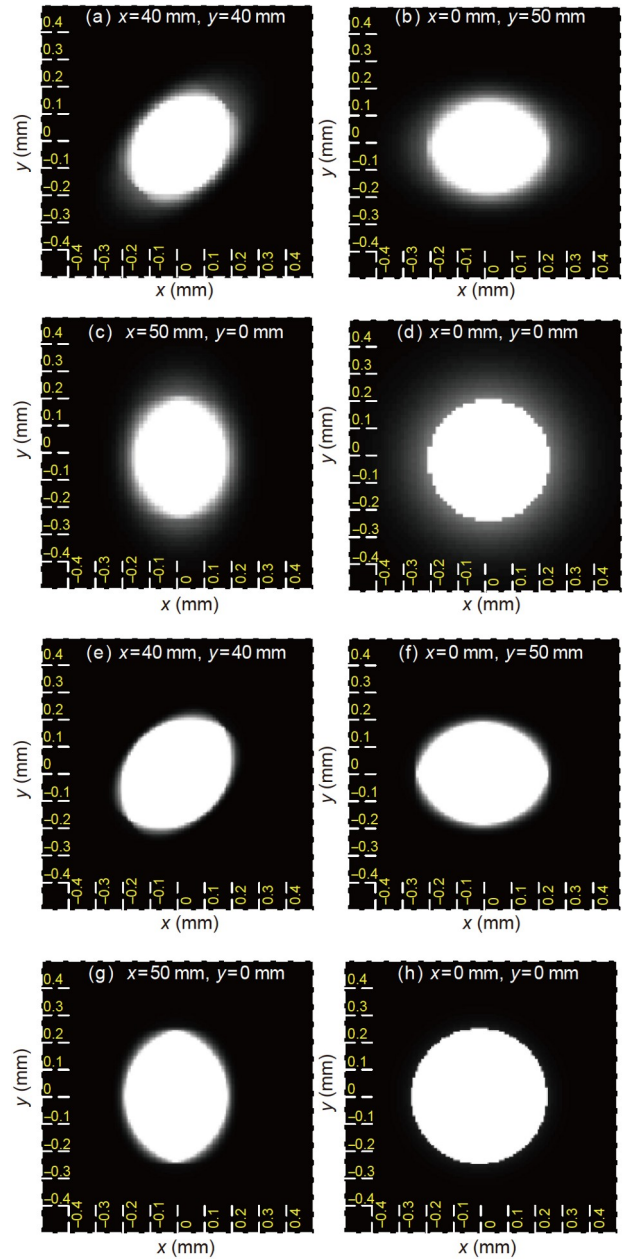


图 4 (网络版彩图)不同射线类型厚针孔像面上不同位置二维点扩散函数. (a)–(d) 14 MeV中子入射; (e)–(h) 1.25 MeV伽马入射

Figure 4 (Color online) Two-dimensional point spread functions of different positions at image plane with different types of incident particles. (a)–(d) 14 MeV neutron incidence; (e)–(h) 1.25 MeV gamma ray incidence.

产生自由电子、自由空穴和电子-空穴对, 它们将激子(色心)激发至激发态, 在退激过程中发光. 脉冲射线束成像系统中所关注的图像转换屏主要性能参数有光产

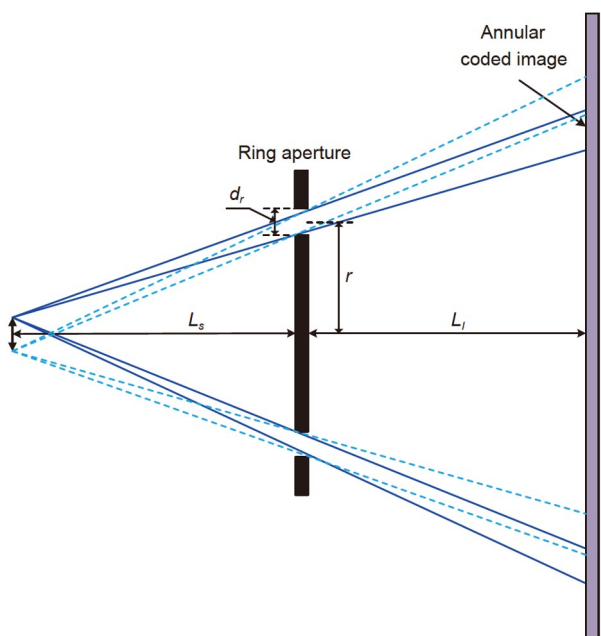


图 5 (网络版彩图) 环形编码孔成像原理示意图

Figure 5 (Color online) Schematic diagram of imaging by ring aperture.

额、时间衰减常数、空间分辨率、发射光谱、均匀性、线衰减系数、机械加工性能等。

射线图像转换屏在 MeV 级脉冲射线成像系统中除了将射线转换为光电器件可探测的可见光之外, 还起到量子增强的重要作用, 即入射 1 个 γ 伽马射线或中子通常可以产生上百个光子。由于能量为 MeV 的中子、伽马穿透能力很强, 为了避免射线对闪烁体后的光电器件或玻璃纤维类光导的影响, 通常采用中继镜头+平面或抛物面反射镜偏折光路的方式进行光学耦合,

这种光传递系统的耦合效率一般在 10^{-2} 量级^[32,33]。此外, 像增强器光阴极光子-电子转换过程的量子效率在 10^{-1} 量级, 为了保证成像系统较高的探测量子效率, 一般要求射线转换屏的光产额需要 $>10^3 \text{ MeV}^{-1}$ 。图像转换屏的时间衰减常数一般要小于射线源特征时间半高宽的 1/5, 与粒子甄别中利用闪烁体的慢时间成分不同^[34]。在中子伽马混合场测量时, 为了避免高强度伽马射线对中子图像测量的影响, 闪烁体慢成分需要尽可能低^[35], 一般需在 ns 和 10 ns 量级。空间分辨率与射线能量和类型, 以及闪烁体带电粒子阻止本领、折射率、厚度等参数有关^[36]。对于穿透能力较强的射线, 闪烁体厚度一般都在 mm 量级以获得较高探测效率, 随着闪烁体厚度的增加, 闪烁体空间分辨率会有所下降, 对于较厚的平板型闪烁体其空间分辨还与光学系统的 F 数有关^[32,37], 采用较大的 F 数可以抑制大角度荧光对空间分辨的模糊作用。此外还可采用像素阵列的形式提高探测效率, 各像素尺寸受工艺限制较大且不同像素间存在一定的串扰, 目前这种方式的闪烁体阵列空间分辨率不如平板型闪烁体^[38,39]。近年来发展的金属敏化有机闪烁体^[40]、二维钙钛矿闪烁体^[41]在提高 X 射线成像系统性能方面取得了一定的进展, 但对 MeV 中子和伽马成像系统性能改善作用并不显著。我们在进行系统设计时常用的射线图像转换屏及其主要性能如表 3 所示^[42-45]。

2.3 时间选通型可见光像增强器

经过闪烁体转换得到的荧光图像通过镜头或传像束等光传递系统成像到像增强器上, 像增强器在脉冲

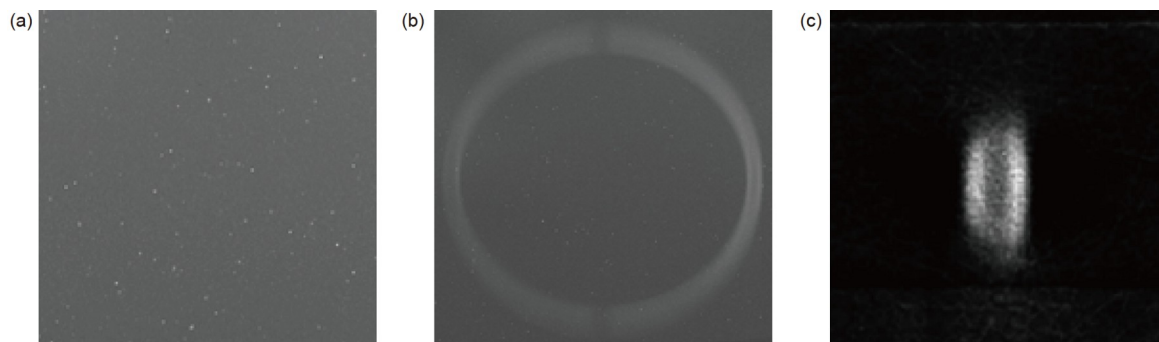


图 6 X 射线焦斑形状环形编码孔与厚针孔测量结果对比. (a) 0.2 mm 厚针孔测量结果; (b) 0.2 mm 宽度环形编码孔测量结果; (c) 图(b)环形编码孔 RL 算法重建结果

Figure 6 Comparisons of the experimental results acquired by ring aperture and thick pinhole for X-ray spot. (a) Experimental result measured by 0.2 mm diameter pinhole; (b) experimental result measured by 0.2 mm width ring aperture; (c) RL reconstructed image of ring aperture in (b).

表 3 常用射线图像转换屏及其主要性能

Table 3 The main performances of scintillating screen commonly used in the imaging system

图像转换屏	光产额 (photons/MeV)	发射光谱 (nm)	线衰减系数 (cm^{-1})	时间衰减常数 (ns)	空间分辨 (lp/mm@10%MTF)	密度 (g cm^{-3})	折射率
BC408-5mm	10000	425	0.09 (n_{14} MeV)	2.1	~ 2.2 (n_{14} MeV)	1.032	1.58
BC408-2mm	10000	425	0.09 (n_{14} MeV)	2.1	~ 3.3 (n_{14} MeV)	1.032	1.58
液闪阵列-5cm	12300	424	0.09 (n_{14} MeV)	3.5	$\sim 1.8^{[42]}$ (n_{14} MeV)	0.959	1.58
LYSO:Ce-5mm	30000	420	0.37 ($\gamma_{1.25}$ MeV)	41	$\sim 2.5^{[43,44]}$ ($\gamma_{1.25}$ MeV)	7.1	1.82
LYSO:Ce-5mm-500K	3000	420	0.37 ($\gamma_{1.25}$ MeV)	5	$\sim 2.5^{[43]}$ ($\gamma_{1.25}$ MeV)	7.1	1.82
LaBr ₃ :Ce-5mm	63000	380	0.23 ($\gamma_{1.25}$ MeV)	16	~ 2.5 ($\gamma_{1.25}$ MeV)	5.3	1.90
Yb:YAG-5mm	800	320	0.24 ($\gamma_{1.25}$ MeV)	1.2	$\sim 2.5^{[45]}$ ($\gamma_{1.25}$ MeV)	4.56	1.82

射线束成像系统中起到电子快门和图像增强的作用。当前在脉冲辐射成像中使用的像增强器主要为双近贴型像增强器, 其结构如图7所示。

表3中脉冲辐射成像领域常用闪烁体发光光谱主要在300–450 nm之间, 为了与闪烁体光谱更好的匹配, 宜采用S20(SbNa₂K)或GaAsP光阴极材料。三代像增强器中使用的GaAs光阴极对红光和近红外响应更好, 三种光阴极光谱响应曲线如图8所示。

S20光阴极本身面电阻较大, 为 $10^{10-11} \Omega/\text{cm}^2$, 需要在光阴极后面增镀导电金属膜或金属网^[46,47]以提高时

间响应, 当采用Ni金属膜将面电阻降至 $100 \Omega/\text{cm}^2$ 时, 其光电子透过率下降为50%左右; GaAsP光阴极与GaAs光阴极材料本身面电阻在几十 Ω/cm^2 ; GaAsP和GaAs光阴极具有负电子亲和势, 为了保护光阴极, 通常在微通道板前增加防离子反馈膜以提高光阴极寿命, 但在脉冲选通状态下, 防离子反馈膜会显著影响时间选通性能^[48], 因此当像增强器工作在选通成像状态时, 需要去掉防离子反馈膜。像增强器时间响应采用式(11)估计, 与工程应用实际较为接近^[49]:

$$\tau \sim \frac{RC}{\pi}, \quad C = \epsilon S / \Delta, \quad (11)$$

式中, R 为光阴极面电阻, C 为光阴极与微通道板之间的电容, ϵ 为光阴极介电常数, S 为光阴极面积, Δ 为像增强器光阴极和第一近贴距离。脉冲辐射成像中的像

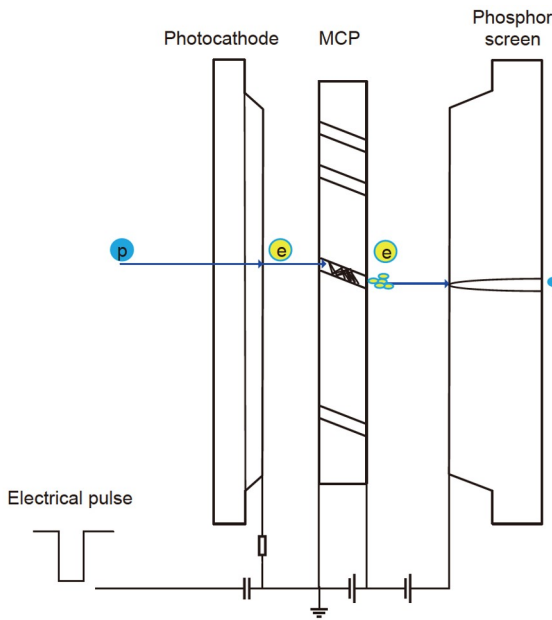


图 7 (网络版彩图)双近贴像增强器结构示意图

Figure 7 (Color online) The schematic diagram of dual proximity focused image intensifier.

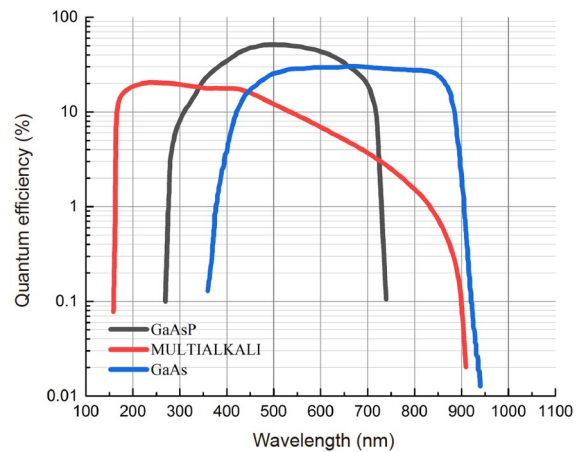


图 8 (网络版彩图)脉冲射线束成像系统中常用像增强器光阴极光谱响应曲线

Figure 8 (Color online) The spectrum response of photocathode material commonly used in pulsed radiation beam imaging system.

增强器光阴极面电阻要求一般为 $R < 100 \text{ } \Omega/\Upsilon$, 光阴极与微通道板之间的距离在 $0.05\text{--}0.1 \text{ mm}$, 常用光阴极直径为 18 或 25 mm , 由式(11)计算的时间响应 $< 1 \text{ ns}$.

时间选通型像增强器一般选用单片或双片微通道板实现电子倍增, 其增益与微通道板两端工作电压、长径比、二次电子发射系数等有关, 一般在 $10^3\text{--}10^4$. 微通道板的噪声因子是影响像增强器整体性能的重要因素, 可以用式(12)来近似^[50], 该式为输入信噪比与输出信噪比平方的比:

$$F_{\text{MCP}} = \frac{1}{T_{\text{of}}} \left(1 + b + \frac{1}{g} \right), \quad (12)$$

式中, T_{of} 为微通道板开口率, b 为Polya分布因子, g 为微通道板单级平均增益, 其中 $b=1$ 为Furry分布时, 式(12)估计结果与实验结果接近. 在文献中也有将输入信噪比与输出信噪比的比值直接定义为MCP噪声因子, 用来作为比较制作工艺对MCP性能影响的量化指标^[51].

选通型像增强器后端一般通过CCD相机和CMOS相机记录, 通常选用亮度增益高、余辉时间较长的P20荧光屏, 在由CCD或CMOS相机连续双帧曝光获得两幅百ns间接时间分辨图像的特殊应用场景, 需采用余辉时间较短的P46或P47荧光屏^[52], 入射光脉冲宽度不同, 荧光屏余辉1%衰减时间有明显差别, 例如常用的P20荧光屏在稳态光入射条件下, 1%余辉时间约为 100 ms , 而在 100 ns 光激发下, 1%余辉时间约为 $100 \text{ } \mu\text{s}$.

常用荧光屏性能如表4所示.

像增强器工作在脉冲选通状态时有两个特殊性能参数需要注意, 一是脉冲选通状态下空间分辨率与稳态下空间分辨之间存在差异. 动态空间分辨率与静态分辨率之比称为空间分辨下降因子, 与光阴极时间响应和光阴极光电子在不同电压下的弥散半径不同有关. 在 5 ns 选通脉冲下实测S20光阴极快响应像增强器空间分辨下降因子为 $0.5\text{--}0.7$ ^[14], 简化理论模型计算得到的下降因子为 0.65 ^[13]. 二是电快门宽度与光快门之间存在差异^[53]. 表5为S20光阴极和GaAs光阴极快响应像增强器利用激光走时方法^[54]测量得到的光快门与电快门之间的差异, 这种差异与外加正向偏压和光阴极时间响应有关.

2.4 全局快门型CMOS相机

在脉冲射线束成像系统中, 像增强器荧光屏图像多采用CCD或CMOS相机转换为数字图像. 近年来, 我们设计研发了一种全局快门型CMOS相机^[55], 该相机单像素面积 $6.5 \text{ } \mu\text{m} \times 6.5 \text{ } \mu\text{m}$, 分辨率 1024×1280 , 帧频率最高 800 帧/秒 , 具有 2×2 片上binning功能, 帧频可提高到 $3200 \text{ fps}@512 \times 512$, 量化位数 12 bit , 能够在 ms 时间内远程传输数据. 该相机像素结构如图9所示.

利用全局快门型CMOS图像传感器光敏区与浮置栅极独立控制信号, 可实现双帧曝光功能, 其时序设计如图10所示. 在外部触发信号 $T0$ 到来之前, 保持CMOS

表 4 时间选通型像增强器常用荧光屏主要性能

Table 4 The performances of phosphor screens usually used in temporally gating image intensifier

荧光屏	量子增益 (光子/电子@5 kV)	1%余辉时间 (100 ns入射)	发光光谱峰值 (nm)
P20	320	$\sim 100 \text{ } \mu\text{s}$	540
P46	55	$\sim 1 \text{ } \mu\text{s}$	530
P47	64	$\sim 300 \text{ ns}$	410

表 5 光快门与电快门参数对比

Table 5 Comparison of the parameters between electrical gated pulse and optical gated pulse

	无离子反馈膜GaAs光阴极 ($\Phi 18 \text{ mm}$)	有离子反馈膜GaAs光阴极 ($\Phi 18 \text{ mm}$)	S20阴极 ($\Phi 25 \text{ mm}$)	电快门 (-250 V , $+50 \text{ V}$ 偏压)
半高宽 (ns)	17.3	14.8	21.0	16.9
10%–90% (ns)	5.6	5.3	8.2	5.0
10%–50% (ns)	2.1	2.4	1.54	1.6

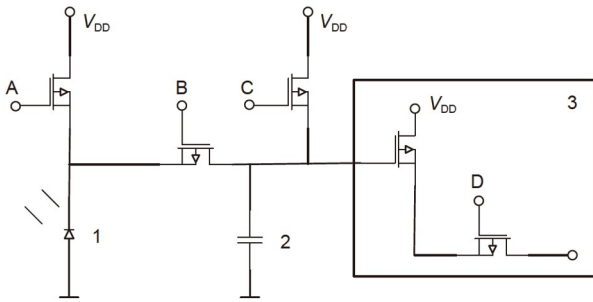


图 9 全局快门型CMOS传感器像素结构. 1-像素光敏区, 2-像素浮置栅极, 3-像素信号读出电路, A-光敏区复位控制信号, B-浮置栅极与光敏区之间的转移控制信号, C-浮置栅极复位控制信号, D-像素信号读出控制信号

Figure 9 Pixel structure of global gated CMOS sensor. 1-Pixel photosensitive area, 2-pixel floating grid, 3-pixel signal readout circuit, A-reset control signal of photosensitive area, B-transfer control signal between floating gate and photosensitive area, C-reset control signal of floating grid, D-control signal of pixel signal readout.

图像传感器像素光敏区处于清零状态, 光敏区复位控制信号A打开, 浮置栅极与光敏区之间的转移控制信号B和浮置栅极复位控制信号C均关闭. 在触发信号到来时刻 T_0 , CMOS图像传感器开始第一帧图像的曝光, 信号A置为无效、信号C有效, 清除像素浮置栅极的无效电荷信号; 在 T_1 时刻, 将第一帧图像对应的感应电荷信号从像素光敏区转移至像素浮置栅极; 在 T_2 时刻, 停止第一帧图像的曝光, 此时像素信号读出电路将第一帧曝光时间为 T_{EXP} 的图像读出; 在 T_3 时刻, CMOS图像传感器开始第二帧图像的曝光, 到 T_6 时刻结束曝光, 之后输出第二帧图像. 通过设置浮置栅极转移与复位之间的时间关系, 可以实现500 ns最短曝光时间, 双帧曝光的最小时间间隔 T_{INT} 约为百ns, 利用该方法与时间选通型像增强器相结合, 能够建立亚 μ s间隔、ns级时间分辨率双帧ICMOS相机.

2.5 同步触发与时间关联

脉冲射线束成像技术在实际应用过程中, 除了需要对时间分辨、空间分辨、灵敏度、统计性等性能研究之外, 还需要确定所获得的图像与射线束产生之间的时间关系, 这就需要建立同步触发与时间关联系统, 典型的时间关联系统由触发和定时探测器、同步机、快门脉冲发生器组成, 一种针对百ns时间尺度射线源的触发与时间关联系统如图11所示.

由于同步机和快门发生器都存在时间延迟, 一般为10 ns量级, 信号传输过程也同样存在时间延迟, 因此触发信号一般选择早期射线信号, 或者由装置产生的电信号, 定时探测器需要能够反映射线源的主要时间特征, 一般与射线强度峰值或50%进行时间关联. 同步机将触发信号转换为具有同一时间基准的多路同步信号^[56], 不同通道之间时间分散性 <0.2 ns, 触发晃动 <0.5 ns, 脉宽和延迟可调, 具有防止二次触发的自锁功能, 输出幅值为6和12 V, 分别用来触发CMOS相机和快门脉冲发生器. 双近贴像增强器一般采用光阴极选通, 选通脉冲电压在-200—400 V, 用来产生选通脉冲的快门发生器常用的两种电路为多级雪崩晶体管串并联电路和基于金属氧化物半导体场效应管(MOSFET)的脉冲产生电路^[57,58], 产生的快门脉冲上升沿和下降沿 <2.5 ns, 脉冲半高宽 ≥ 3 ns, 不同通道之间的时间分散性 <0.5 ns.

不同时刻图像的相对时间关联精度由同步机和快门发生器性能、传输时间测量不确定度、信号判读不确定度等决定. 图11所示系统, 不同图像之间的时间关联精度能够优于2 ns, 与射线源特征时间之间的时间关联精度还与定时探测器时间测量的特征时间不确定度有关, 一般为3—5 ns.

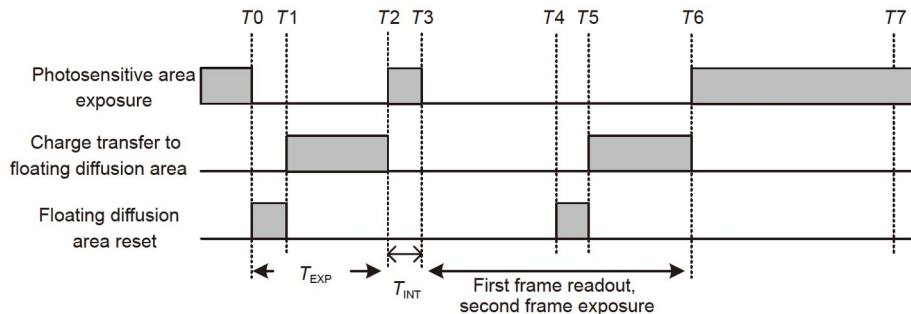


图 10 CMOS图像传感器超快双帧曝光时序

Figure 10 Ultra-fast dual-frame exposure timing of CMOS image sensors.

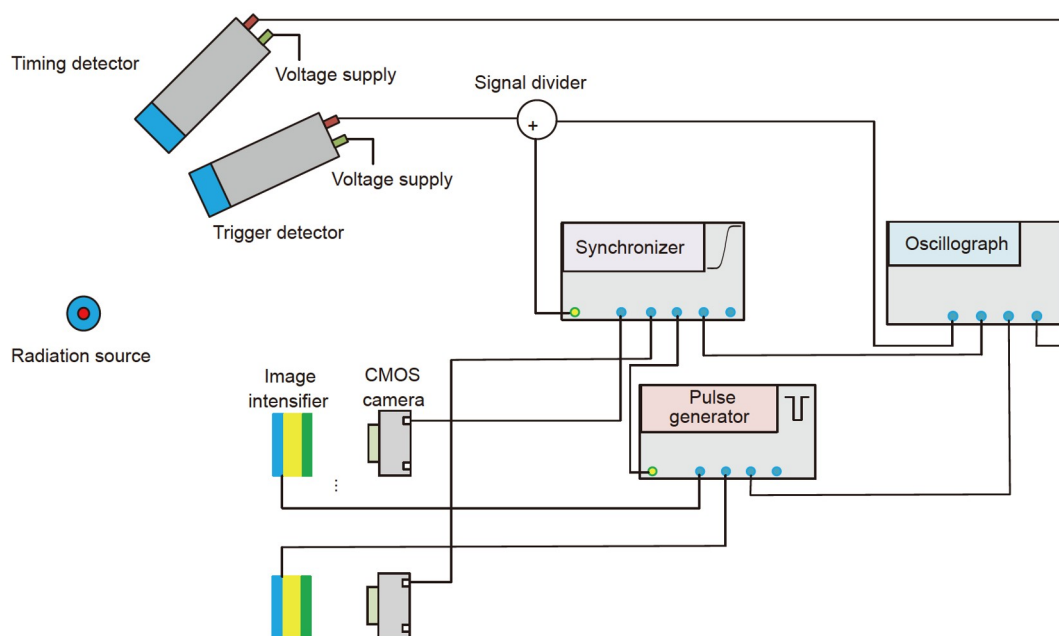


图 11 (网络版彩图)同步触发与时间关联系统示意图

Figure 11 (Color online) Schematic diagram of synchro trigger and temporal relating system.

3 脉冲射线束成像技术展望

脉冲射线束成像技术发展历程尽管已经有几十年时间,随着国家点火等大科学工程的不断推进,实验室射线源产额不断提高,为发展具有高空间分辨、快时间分辨、高能量分辨的脉冲射线束成像技术提供了强烈的需求牵引,是当前十分活跃的研究领域。

脉冲射线束成像技术最近的一些研究方向值得关注,一是发展亚ns时间分辨成像技术.通过在光阴极上制作微带型衬底,通过渐近阻抗匹配设计、降低微带面电阻等措施将可见光像增强器时间响应进一步降低至百ps量级^[59],目前该类型器件成像面积较小,限制了其在高空间分辨需求场景的应用.美国圣地亚实验室研发了最短曝光时间可以达到1 ns时间分辨的hCMOS相机,像素数1024×512,单像素尺寸为25 μm×25 μm,一次实验可获得四幅图像^[60],具有代替基于时间选通像增强器分幅相机的潜力,hCMOS相机结合时间拉伸技术^[61–63],实现亚ns时间分辨.脉冲射线束在金刚石、InP半导体材料产生非平衡载流子复合过程可以达到十到百ps量级,利用外加探针光将非平衡载流子浓度分布再现,从而获得射线源的空间分布,系统的时间

分辨由探针光的特征时间宽度和非平衡载流子复合时间决定.利用1064 nm激光衍射方法可探测的非平衡载流子浓度下限约为 10^{18} cm^{-3} ,目前用于成像的半导体光栅器件厚度在百μm量级,需要重点解决MeV级中子、伽马的探测效率低的问题^[64,65].二是脉冲射线束成像系统与算法相结合.当前脉冲射线束成像系统的空间分辨能力约为测试视场的1/100量级,将空间分辨提高到视场的1/1000是当前脉冲射线束成像技术亟需突破的技术能力之一.受限于厚针孔视场与空间分辨的妥协、射线束在闪烁体中能量沉积及荧光的弥散、像增强器动态空间分辨的下降等因素,在10 cm视场条件下,当前脉冲射线束成像系统的物理分辨很难达到100 μm,结合超分辨理论以及深度学习算法^[66],可获得比成像系统物理本征分辨更高的空间分辨能力;利用多个成像光轴,结合极少角度投影三维重建算法,可获得脉冲射线源的三维结构^[67,68];采用超快编码压缩成像技术^[69],将后端成像用CMOS相机替换为图像编码二维条纹相机,实现连续时间分辨或能量分辨成像等。

在实际应用中,如何在获得高时间分辨或实现更高维度测量的基础上保持较高的空间分辨,是当前脉冲射线束成像技术发展所面临的重大技术困难,需要

在成像方法、关键器件研制、系统设计、数据处理等方面开展综合性的创新工作.

上述新技术在脉冲射线束测量领域的发展与应

用, 将进一步提升脉冲射线束成像技术的能力, 在表征射线源性能、校验物理设计与数值模拟程序方面发挥更重要的作用.

致谢 本文所涉及内容较为具体而广泛, 写作过程中参考了项目组集体研究、共同发表的部分成果, 与宋顾周研究员、段宝军副研究员、李阳副研究员、张美副研究员、杨少华正高级工程师等专家进行了充分讨论, 并得到他们的热情帮助, 在此表示感谢! 西北核技术研究所脉冲射线束成像技术研究方向是在吕敏院士、王奎禄研究员等科技工作者集智攻关、不懈努力下建立起来的, 在此向他们表示崇高的敬意!

参考文献

- 1 Lv M, Wang K L. Pulsed Radiation Measurement Technology of Nuclear Test (in Chinese). Beijing: National Defense Industry Press, 2006 [吕敏, 王奎禄. 核试验脉冲射线测量技术. 北京: 国防工业出版社, 2006]
- 2 Liu Q Z. Diagnostics of Pulsed Radiation Field (in Chinese). Beijing: Science Press, 1994 [刘庆兆. 脉冲辐射场诊断技术. 北京: 科学出版社, 1994]
- 3 Lindl J D, Amendt P, Berger R L, et al. The physics basis for ignition using indirect-drive targets on the National Ignition Facility. *Phys Plasmas*, 2004, 11: 339–491
- 4 Craxton R S, Anderson K S, Boehly T R, et al. Direct-drive inertial confinement fusion: A review. *Phys Plasmas*, 2015, 22: 110501
- 5 Gomez M R, Slutz S A, Sefkow A B, et al. Demonstration of thermonuclear conditions in magnetized liner inertial fusion experiments. *Phys Plasmas*, 2015, 22: 056306
- 6 Krtcher A L, Zylstra A B, Callahan D A, et al. Achieving record hot spot energies with large HDC implosions on NIF in HYBRID-E. *Phys Plasmas*, 2021, 28: 072706
- 7 Cheng B, Bradley P A, Finnegan S M, et al. Fundamental factors affecting thermonuclear ignition. *Nucl Fusion*, 2021, 61: 096010
- 8 Frenje J A. Nuclear diagnostics for Inertial Confinement Fusion (ICF) plasmas. *Plasma Phys Control Fusion*, 2020, 62: 023001
- 9 Rosenberg M J, Zylstra A B, Séguin F H, et al. A direct-drive exploding-pusher implosion as the first step in development of a monoenergetic charged-particle backlighting platform at the National Ignition Facility. *High Energy Density Phys*, 2016, 18: 38–44
- 10 Anger H O. Use of a gamma-ray pinhole camera for *in vivo* studies. *Nature*, 1952, 170: 200–201
- 11 Xie H W, Song G Z, Zhang Z H, et al. Simulating of pinhole imaging (in Chinese). *Test Res*, 2004, 27: 19–29 [谢红卫, 宋顾周, 张占宏, 等. 厚针孔成像模拟计算. 试验与研究, 2004, 27: 19–29]
- 12 Zhang Y H, Sheng L, Zhang M. Simulation of ring-coded aperture imaging with space-variant point spread function and image restoration (in Chinese). *High Power Laser Particle Beams*, 2016, 28: 124003 [张艳红, 盛亮, 张美. 空变环形编码孔成像模拟与图像复原. 强激光与粒子束, 2016, 28: 124003]
- 13 Sheng L, Hei D W, Qiu M T, et al. Dynamic resolution of nanosecond time-gated imaging system (in Chinese). *Nucl Elec Detect Technol*, 2008, 28: 274–277 [盛亮, 黑东炜, 邱孟通, 等. 纳秒时间选通成像系统动态空间分辨率. 核电子学与探测技术, 2008, 28: 274–277]
- 14 Zhu H, Wang K, Xiang S, et al. Dynamic modulation transfer function measurement of image intensifiers using a narrow slit. *Rev Sci Instrum*, 2008, 79: 023708
- 15 Ma J M, Zhu H Q, Wang K L, et al. Fluorescence dispersion of Lu_2SiO_5 crystal as a γ -image converter (in Chinese). *Appl Opt*, 2010, 31: 752–756 [马继明, 朱宏权, 王奎禄, 等. 硅酸镭 γ 图像转换屏荧光弥散特性研究. 应用光学, 2010, 31: 752–756]
- 16 Sheng L, Wang K L, Lv M, et al. Cascaded model and detective quantum efficiency for lens coupled ICCD camera (in Chinese). *Acta Photon Sin*, 2007, 36: 1701–1704 [盛亮, 王奎禄, 吕敏, 等. 透镜耦合ICCD相机级联模型和探测量子效率. 光子学报, 2007, 36: 1701–1704]
- 17 Zhu H Q. Study on the Image Restoration of γ -Ray Pinhole Imaging System (in Chinese). Dissertation for Doctoral Degree. Beijing: Tsinghua University, 2008 [朱宏权. γ 射线针孔照相系统的图像复原研究. 博士学位论文. 北京: 清华大学, 2008]
- 18 Day R D, Brooks P M, Edwards R L, et al. Fabrication of a 3×3 neutron pinhole array. *Fusion Sci Tech*, 2007, 51: 776–781

- 19 Wang Y, Li Q, Liu Y L, et al. Structure design of thick pinhole with double cones for spot size measurement of the linear induction accelerator light source (in Chinese). *High Power Laser Particle Beams*, 2019, 31: 065102 [王毅, 李勤, 刘云龙, 等. 用于直线感应加速器光源焦斑测量的双锥厚针孔结构设计. *强激光与粒子束*, 2019, 31: 065102]
- 20 Song G Z, Ma J M, Wang K L, et al. Analysis of Figure of merit for thick pinhole imaging (in Chinese), *Acta Phys Sin*, 2012, 61: 102902 [宋顾周, 马继明, 王奎禄, 等. 厚针孔射线成像品质因素的研究. *物理学报*, 2012, 61: 102902]
- 21 Wilson D C, Christensen C R, Morgan G L, et al. Goals for and design of a neutron pinhole imaging system for ignition capsules. *Rev Sci Instrum*, 2003, 74: 1705–1708
- 22 Christensen C R, Barnes C W, Morgan G L, et al. First results of pinhole neutron imaging for inertial confinement fusion. *Rev Sci Instrum*, 2003, 74: 2690–2694
- 23 Smith M F, Jaszczak R J. The effect of gamma ray penetration on angle-dependent sensitivity for pinhole collimation in nuclear medicine. *Med Phys*, 1997, 24: 1701–1709
- 24 Accorsi R, Metzler S D. Analytic determination of the resolution-equivalent effective diameter of a pinhole collimator. *IEEE Trans Med Imag*, 2004, 23: 750–763
- 25 Nugent K A, Luther-Davies B. Application of penumbral imaging to thermonuclear neutrons. *J Appl Phys*, 1985, 58: 2508–2515
- 26 Jia Q G, Hu H S, Zheng X Y, et al. Optimal design of coded aperture used for Z-Pinch driven fusion neutron imaging. *Sci China Tech Sci*, 2015, 58: 1289–1293
- 27 Cannon T M, Fenimore E E. A class of near-perfect coded apertures. *IEEE Trans Nucl Sci*, 1978, 25: 184–188
- 28 Wang D, Ruskov I N, Hu H, et al. Gamma-ray imaging with a time-modulated random coded aperture. *Rev Sci Instrum*, 2019, 90: 015107
- 29 Ress D, Lerche R A, Da Silva L. Demonstration of an X-ray ring-aperture microscope for inertial-confinement fusion experiments. *Appl Phys Lett*, 1992, 60: 410–412
- 30 Zhang M. Study on the Subnanosecond Temporal Resolution Fusion Neutron Ring Coded Imaging (in Chinese). Dissertation for Doctoral Degree. Xi'an: Xi'an Jiaotong University, 2018 [张美. 亚ns时间分辨聚变中子环孔编码成像技术研究. 博士学位论文. 西安: 西安交通大学, 2018]
- 31 Zhang M, Hu H S, Sheng L, et al. Ring coded imaging for hard X-ray focal spot (in Chinese). *Nucl Fusion Plasma Phys*, 2017, 37: 404–410 [张美, 胡华四, 盛亮, 等. 硬X射线焦斑环形编码成像的理论与实验研究. *核聚变与等离子体物理*, 2017, 37: 404–410]
- 32 Song G Z, Wang K L, Ma J M, et al. Analysis on coupling between scintillator and lens in radiographic imaging system (in Chinese). *High Power Laser Particle Beams*, 2012, 24: 471–475 [宋顾周, 王奎禄, 马继明, 等. 辐射成像系统中图像转换屏与物镜耦合的分析. *强激光与粒子束*, 2012, 24: 471–475]
- 33 de Haan V O, van der Hagen T H J J. Proposal for enhanced spatial resolution and efficiency of a fast-neutron scintillator detector by use of a parabolic mirror. *Nucl Instrum Methods Phys Res Sect A*, 2003, 515: 881–885
- 34 Grodzicka-Kobyłka M, Szczesniak T, Swiderski L, et al. Comparison of detectors with pulse shape discrimination capability for simultaneous detection of gamma-rays, slow and fast neutrons. *Nucl Instrum Methods Phys Res Sect A*, 2021, 1019: 165858
- 35 Kubota S, Hishida M, Himi S, et al. The suppression of the slow component in Xenon-doped liquid argon scintillation. *Nucl Instrum Methods Phys Res Sect A*, 1993, 327: 71–74
- 36 Shim H B, Song J, Hahn J W. Analytic solution of the radiative transfer equation for the analysis of the efficiency and spatial resolution of a granular X-ray scintillator. *Opt Express*, 2017, 25: 32686–32696
- 37 de Haan V O, van der Hagen T H J J. Optimisation of fast-neutron detection efficiency and spatial resolution for a radiographic imaging system. *Nucl Instrum Methods Phys Res Sect A*, 2003, 515: 886–891
- 38 Zhang M, Hu H, Li K, et al. High resolution, high efficiency liquid scintillator capillary array for gamma imaging. *Rev Sci Instrum*, 2018, 89: 073506
- 39 Song Y, Zhang M, Duan B J, et al. A high-speed radiation imaging system based on liquid scintillator filled capillary arrays. *Rev Sci Instrum*, 2022, 93: 033702
- 40 Allendorf M, Houk R, Bhakta R, et al. Scintillating metal organic frameworks: A new class of radiation detection materials. *MRS Proc*, 2009, 1164: 1164-L07-01
- 41 Zheng J, Zeng Y, Wang J, et al. Hydrogen-rich 2D halide perovskite scintillators for fast neutron radiography. *J Am Chem Soc*, 2021, 143: 21302–21311

- 42 Zhang M, Li K N, Li Y, et al. Spatial resolution of novel liquid scintillating capillary array (in Chinese). *Acta Phys Sin*, 2020, 69: 062801 [张美, 李奎念, 李阳, 等. 一种新型的液闪阵列成像屏空间分辨特性. *物理学报*, 2020, 69: 062801]
- 43 Yan W, Li B, Duan B, et al. Temperature dependence of luminescence characteristics of LYSO:Ce scintillator under X-ray excitation. *AIP Adv*, 2022, 12: 065003
- 44 Ma J M, Wang K L, Song G Z, et al. Study on the point spread function of LSO (in Chinese). *Test Res*, 2004, 27: 67–74 [马继明, 王奎禄, 宋顾周, 等. LSO闪烁体点扩散函数研究. *试验与研究*, 2004, 27: 67–74]
- 45 Yan W P, Li B K, Song G Z, et al. Characteristics measurement research of Yb:YAG crystal (in Chinese). *High Power Laser Particle Beams*, 2017, 29: 086002 [严维鹏, 李斌康, 宋顾周, 等. Yb:YAG晶体性能实验测量. *强激光与粒子束*, 2017, 29: 086002]
- 46 Li J, Pang Q C, Peng W D, et al. Gateble image intensifier with a new type of conduct electricity substrate (in Chinese). *Acta Photon Sin*, 2000, 29: 861–864 [李佳, 庞其昌, 彭文达, 等. 选通式象增强器的新型导电基底. *光子学报*, 2000, 29: 861–864]
- 47 Gao J H. The research on ns response time proximity focus image intensifier (in Chinese). *Appl Opt*, 2000, 21: 8–10 [高景华. 纳秒响应近贴型像增强器的研制. *应用光学*, 2000, 21: 8–10]
- 48 Li D. Study on Time Gating and Spatial Resolution Characteristics of GaAs Photocathode Image Intensifier (in Chinese). Dissertation for Master's Degree. Xi'an: Northwest Institute of Nuclear Technology, 2022 [李冬. GaAs光阴极像增强器时间选通与空间分辨特性研究. 硕士学位论文. 西安: 西北核技术研究所, 2022]
- 49 Yates G J, King N S P, Jaramillo S A, et al. Nanosecond image shuttering studies at Los Alamos National Laboratory. *IEEE Trans Nucl Sci*, 1984, 31: 485–489
- 50 Sheng L. Development of Optical-Framing Camera and Imaging Diagnostics for Wire Array Z-Pinch (in Chinese). Dissertation for Doctoral Degree. Beijing: Tsinghua University, 2007 [盛亮. 可见光分幅相机研制及丝阵负载Z箍缩图像诊断. 博士学位论文. 北京: 清华大学, 2007]
- 51 Li D, Zhu Y F, Zhao H M, et al. Research on noise factor characteristic of micro-channel plate (in Chinese). *Infrared Technol*, 2017, 39: 1066–1070 [李丹, 朱宇峰, 赵慧民, 等. MCP噪声因子特性研究. *红外技术*, 2017, 39: 1066–1070]
- 52 Liu L, Guo M A, Yan M, et al. High repetition frequency characteristics of image intensifier in high-speed imaging application (in Chinese). *Acta Photon Sin*, 2017, 46: 1123004 [刘璐, 郭明安, 严明, 等. 像增强器在高速成像应用中的高重频特性. *光子学报*, 2017, 46: 1123004]
- 53 Li H Y, Song G Z, Wang K L. Research of optical performances for MCP image intensifier (in Chinese). *Test Res*, 1998, 21: 36–41 [李宏云, 宋顾周, 王奎禄. MCP像增强器光快门特性研究. *试验与研究*, 1998, 21: 36–41]
- 54 King N S P, Yates G J, Jaramillo S A. Nanosecond gating properties of proximity-focused microchannel-plate image intensifiers. In: *Los Alamos Conference on Optics*. SPIE, 1981, 288: 426–433
- 55 Yan M, Li G, Yang S H, et al. A real-time remote image acquisition system based on CMOS image sensor (in Chinese). *Modern Appl Phys*, 2016, 7: 041202 [严明, 李刚, 杨少华, 等. 基于CMOS图像传感器的高实时远程图像采集系统设计. *现代应用物理*, 2016, 7: 041202]
- 56 Qu H G, Tian X X, Zhang Y X, et al. Design of synchronizer of single fast pulse signal with latch (in Chinese). *Nucl Elec Detect Technol*, 2014, 34: 1086–1088 [渠红光, 田晓霞, 张雁霞, 等. 单次快脉冲锁存同步机研制. *核电子学与探测技术*, 2014, 34: 1086–1088]
- 57 Du J Y, Song Y, Guo M A, et al. Design of high-speed and high-voltage pulse generator based on MOSFET (in Chinese). *Nucl Elec Detect Technol*, 2014, 34: 842–845 [杜继业, 宋岩, 郭明安, 等. 基于功率MOSFET的高速高压脉冲产生器. *核电子学与探测技术*, 2014, 34: 842–845]
- 58 Yang W, Wen W L, Zhang X Q, et al. A shutter pulse generator for multi-slit streak camera (in Chinese). *Acta Photon Sin*, 2009, 38: 1371–1374 [杨威, 温文龙, 张小秋, 等. 一种用于多狭缝条纹相机的快门脉冲产生器. *光子学报*, 2009, 38: 1371–1374]
- 59 Zhang M, Sheng L, Hu H, et al. Theoretical and experimental investigation of gating performance of subnanosecond image intensifier with microstrip photocathode. *IEEE Trans Nucl Sci*, 2018, 65: 2310–2315
- 60 Hurd E R, Tate T, Dayton M S, et al. Time resolved near field (TRNF) diagnostics four-frame nanosecond gated hybrid CMOS image sensor. *SPIE*, 2020, 1114: 1111413
- 61 Hilsabeck T J, Nagel S R, Hares J D, et al. Picosecond imaging of inertial confinement fusion plasmas using electron pulse-dilation. *SPIE*, 2016, 10328: 103280S
- 62 Cai H, Fu W, Bai Y, et al. Simulation of a dilation X-ray framing camera. *J Electron Imag*, 2017, 26: 043003
- 63 Nagel S R, Carpenter A C, Park J, et al. The dilation aided single-line-of-sight X-ray camera for the National Ignition Facility: Characterization and fielding. *Rev Sci Instrum*, 2018, 89: 10G125
- 64 Peng B D, Song Y, Sheng L, et al. Research on MeV pulsed radiation detection based on refractive index modulation (in Chinese). *Acta Phys Sin*,

- 2016, 65: 157801 [彭博栋, 宋岩, 盛亮, 等. 辐射致折射率变化用于MeV级脉冲辐射探测的初步研究, 物理学报, 2016, 65: 157801]
- 65 Song Y, Peng B, Wang H X, et al. Development of an all-optical framing camera and its application on the Z-pinch. *Opt Express*, 2017, 25: 32074–32079
- 66 Tian J, Ma K K. A survey on super-resolution imaging. *SIViP*, 2011, 5: 329–342
- 67 Volegov P L, Danly C R, Merrill F E, et al. On three-dimensional reconstruction of a neutron/X-ray source from very few two-dimensional projections. *J Appl Phys*, 2015, 118: 205903
- 68 Sheng L, Zhang Y H, Gao J P, et al. Three-dimensional neutron imaging reconstruction algorithms research of pulsed radiation sources (in Chinese). *Acta Photon Sin*, 2022, 51: 0311001 [盛亮, 张艳红, 高建鹏, 等. 脉冲射线源三维中子成像重建算法研究. 光子学报, 2022, 51: 0311001]
- 69 Gao L, Liang J, Li C, et al. Single-shot compressed ultrafast photography at one hundred billion frames per second. *Nature*, 2014, 516: 74–77

Key technologies of pulsed radiation beam imaging

SHENG Liang^{1,2*} & HEI DongWei^{1,2}

¹ National Key Laboratory of Intense Pulsed Radiation Simulation and Effect, Xi'an 710024, China

² Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China

Pulsed radiation beam imaging is one of the fundamental diagnostic technologies for studying the performance of nuclear reaction devices, such as in the field of inertial confinement fusion. The measurement object is a MeV-scale neutron or gamma ray emitted from a radiation source. The characteristic temporal scale is from nanosecond to microsecond, and the spatial scale is from sub-millimeter to 10 cm. This study introduces the development of pulsed radiation beam imaging technology in recent years at Northwest Institute of Nuclear Technology. A novel non-opposite vertex design of a thick pinhole and a ring aperture with high detection efficiency were explored. Large-area scintillators and a liquid-scintillating capillary array for converting radiation to light were developed and investigated. The fast-temporal-response design requirements for an image intensifier were introduced, and the gating properties and dynamical spatial resolution for this kind of image intensifier were comprehensively studied. A dual-frame Complementary Metal Oxide Semiconductor (CMOS) camera with an exposure time of hundreds of nanoseconds was achieved using a specific global gate-driven timing design. A trigger and timing system for relating the image gating time to the characteristic time of radiation sources, consisting of a trigger detector, timing detector, synchronizer, and pulse generator, was explored. The timing precision of the system was approximately 3–5 ns. Advanced technologies, including ultrafast temporal resolution, super spatial resolution, and high-dimensional imaging, were also discussed.

neutron/gamma imaging, pulsed radiation beam, nuclear reaction, inertial confinement fusion

PACS: 28.20.Pr, 52.59.-f, 25.70.Jj, 52.57.-z

doi: [10.1360/SSPMA-2022-0478](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2022-0478)