# 第五届半导体辐射探测器研讨会



## 基于像素型CZT探测器的强流质子束斑原型成像系统

**周自衡**<sup>1,2</sup>, 封常青<sup>1,2</sup>, 秦阳辉<sup>1,2</sup>, 刘树彬<sup>1,2</sup> <sup>1</sup>核探测与核电子学国家重点实验室, 中国科学技术大学, 安徽 合肥 230026 <sup>2</sup>近代物理系, 中国科学技术大学, 安徽 合肥 230026 Email: zzh203@mail.ustc.edu.cn

#### <u>1. 研究背景</u>

强流质子束作为散裂中子源和加速器驱动的次临界系统(Accelerator Driven Sub-critical System, ADS)等大科学装置的核心部分,其流强提升是 未来散裂中子源的主要发展方向,也是未来ADS实现高功率次临界堆芯的 诉求,当前计划建设的装置束流功率约为10<sup>2</sup> kW至10<sup>1</sup> MW量级,质子能 量为GeV量级。然而,随着束流强度的提高,多级加速器和束流输运系统 输出的质子束流强分布往往具有较大的不确定性,这增加了散裂靶站稳定 运行的难度。为了为散裂靶的控制系统、冷却系统等提供关键信息,准确 地测量靶前质子束剖面分布是至关重要的。

目前应用的直接或间接的测 量方法都将面临流强提升带来的测 量系统性能下降快和寿命短等问题, 需要寻找更加适合的方法。我国首 次提出了利用散裂反应次级伽马射 线进行靶前质子束斑成像的方法, 该方法无需引入其他与质子束流产 生相互作用的装置,又可以将探测 装置放置在远离靶站的低辐射区, 有望成为解决强流质子束剖面监测 问题的重要方法之一。本研究通过 物理仿真分析、原型系统的设计实 现及初步测试,首次详细论证了该 技术方案的可行性。



多丝剖面监测器 DPA辐射损伤、电子热运动干扰



靶前荧光涂层+光路+照相机 <sub>荧光涂层辐射损伤、效率下降快</sub>

## 2. 成像方案

强流质子束与散裂靶相互作用的产物丰富,其中次级伽马射线和中子的强度最高,且几乎不会受到质子输运系统偏转磁场的影响,是测量质子束剖面分布的合适候选产物。本研究利用次级伽马射线,提出了基于像素型CZT探测器的针孔伽马成像方案,如下图所示。

### <u>3. 原型成像系统</u>

学校

原型成像系统采用像素型CZT探测器,其读出电子学由前端模拟模块 FEM和数据处理模块DPM组成,探测器阳极的电荷幅度和时间信息通过8 片32通道的模拟ASIC——国产芯片JCF032EB读出,阴极通道通过基于电荷 灵敏放大器 (CSA) 的电荷积分波形数字化方案读出。



JCF032EB的每个读出通道主要包括电荷灵敏放大器、极零相消电路、 快/慢成形放大电路、峰值保持电路、高速比较器、正交定时电路等。由 于电子漂移接近收集阳极时才会在短时间内产生固定形状的电流脉冲信号, 所以弹道亏损很小且与信号幅度比例固定,可忽略。其中反馈电容配置为 60 fF,慢成形CR-RC<sup>4</sup>达峰时间1.9 μs。多像素事例的阳极间时间信息通过 正交定时确定,在对应通道击中时对相互正交的信号采样,归一化后求信 号比值的反正切值即可得到每个通道击中时刻的相位关系。





首先通过基于Geant4的蒙特卡罗模拟分析次级伽马射线与入射质子 束流之间的关系。入射质子能量为1.6 GeV、靶材为钨时,靶面出射次级 伽马射线的效率为2.33 p<sup>-1</sup>;质子束能量更低或靶材换为汞、LBE等时的次 级伽马射线产生效率降低。次级伽马具有如下特征:

- 径向分布:超过90%的次级伽马射线产生位置都在靠近靶面10 mm内;
- 横向分布:入射质子为点源时,次级伽马横向分布的半高全宽(FWHM)
  小于0.5 mm,但其边缘强度较高;
- 出射方向分布:次级伽马射线强度随背散射角θ的增大而减小,在θ小 于π/18内几乎不变,像素型CZT探测装置的布设方向要求并不严格;
- 能量特征:能谱中强度最高的峰为正电子湮灭产生的511 keV,此外钨 靶在825 keV、2.36 MeV、2.48 MeV附近有特征峰。



分析针孔伽马成像参数的影响时,通过物理模拟的结果归一化得到 点扩散函数PSF。下图的模拟条件为:物距R = 30 m,像距r = 60 m,探测 器厚度I<sub>d</sub> = 10 mm,铅准直器厚度L = 100 mm,改变针孔直径d,得到PSF的 变化(下左图);选取511 keV特征能量事例得到下右图,可以看出背景 阴极通道的幅度计算前经过基于FPGA数字梯形成形算法,这种方法 在提高信噪比的同时,还可以消除由变化的信号前沿时间导致的幅度弹道 亏损;时间信息则由信号经数字快成形(基于CR-RC结构的IIR滤波器)后 通过幅度和上升时间补偿定时(ARC)方法检出,由于阴极信号近似为直 线前沿,可以认为定时时刻与信号幅度和上升时间均无关,上升时间过短 时退化为恒比定时。以上信息压缩均通过FPGA在线实现。







#### <u>4. 测试结果</u>

原型电子学大多数阳极通道的等效电荷噪声为0.06~0.07 fC; 阴极-阳极时间差测量精度与阳极信号幅度导致的时间游动效应有关, 信号较大时的定时精度约3 ns。

接入2个11×11像 素的20×20×10 mm<sup>3</sup>探 测器后,利用带狭缝的 94块限制<sup>22</sup>Na源的入射 深度,即限制了DOI, 得到C/A ratio和漂移时 间分别与信号幅度的关 系(右图)。改变DOI 即可测得CAR和C-A time 与DOI的近似线性关系。 通过CAR测量DOI的精度





计算调制传递函数MTF下降至10%时的空间分辨。分别改变L和d得到 空间分辨f<sub>c</sub>,可见L影响图像背景亮度,d影响空间分辨。在L = 100 mm、d = 1 mm时可达好于0.60 lp/mm的空间分辨。

当质子束剖面为10 cm × 10 cm的均匀分布方形时,其次级伽马射线 分布有一定程度的晕散,中心强度不均匀(下左图),图像与入射质子束 分布的Pearson相关系数为0.954;采用联合代数重建方法(SART)进行图 像重建(下右图),重建图像的相关系数提升至0.996,降低了图像退化。



结合探测器信号特征与针孔成像效率、空间分辨、视场等方面需求, 设计原型探测装置时考虑如下方面:

- 像素间距:不超过2 mm;
- 能量探测范围:覆盖0.2~1.3 MeV,大多数次级伽马在此能量范围内;
- 能量分辨率:成像场景中存在复杂的伽马射线背景,需要尽可能好的 能量分辨率以提高有效事例比例和图像信噪比;
- 通道数: 原型装置考虑256阳极和2阴极通道。



通过CAR进行深度灵敏矫正,能量分辨率由1.24%@662 keV(下左图) 提升至1.11%,且由于进行了单像素事例筛选,峰康比由3.0提高至8.4。



使用1.5 Ci的<sup>137</sup>Cs点源进行针孔成像,铅准直器厚度3 cm,针孔直径2 mm,物距和像距分别为1.6 m和1 m,成像结果为直径3.2 mm的圆斑(下 左图),与预期一致。在经过能量筛选和DOI筛选(只选取DOI靠近阴极 0~7 mm的事例,减少图像径向模糊)后,图像的对比度提高(下右图), 峰值信噪比(PSNR)由16提升为23。



#### 第五届半导体辐射探测器研讨会

#### 摘要编号#40