



强流瞬态脉冲辐射场伽马射线探测技术

韩和同, 管兴胤, 卢毅*

西北核技术研究所, 西安 710024

*联系人, E-mail: luyi@nint.ac.cn

收稿日期: 2022-11-28; 接受日期: 2023-01-19; 网络出版日期: 2023-06-20

国家自然科学基金(编号: 12275220, 12205239, 12205238)资助项目

摘要 脉冲辐射场伽马射线探测是诊断强流脉冲辐射装置工作状态、辐射产生物理机制和过程规律信息的主要途径之一, 是各类型辐射装置设计优化、运行监测与控制以及辐射场应用研究不可缺少的技术手段. 本文从探测技术原理、探测器技术及其发展等方面介绍强流脉冲伽马辐射场射线探测技术概况, 供脉冲辐射场测量与诊断研究借鉴参考.

关键词 伽马射线, 强流脉冲, 探测技术

PACS: 07.85.-m, 29.40.-n, 43.20.Px

1 引言

强流瞬态脉冲伽马射线探测属于核科学与技术学科的辐射测量与诊断技术领域. 随着核科学技术的发展, 强流瞬态脉冲辐射场的产生及其应用已经成为新的研究热点, 各种脉冲辐射装置不断出现. 例如, 脉冲反应堆、同步辐射装置、散裂中子源、脉冲粒子加速器、ICF装置等. 这类装置在建设、运行以及开展相关科研活动的初期阶段, 急需获取关于装置工作状态、脉冲辐射产生的物理机制、物理过程的规律性信息, 而射线探测正是探知这类信息的基本手段. 这类装置工作时会在极短的短时间内产生大量粒子, 从而产生高强度的瞬时脉冲中子、脉冲伽马或X射线辐射(就探测技术来讲, 脉冲伽马射线或X射线辐射原理相同, 不

失一般性, 以下统称脉冲伽马), 其强度可达 10^{20} s^{-1} 数量级甚至更高, 主要能量范围达MeV量级. 由于不受飞行时间弥散的影响, 脉冲伽马射线辐射场的强度随时间变化的关系或称时间强度谱, 能够实时、真实地反映装置中微观粒子相互作用的时间行为, 进而可以为诊断装置的性能、检验其理论计算和结构设计提供关键的时间过程信息^[1-4]. 另外, 当利用脉冲辐射源作为研究工具时, 也必须首先掌握脉冲辐射装置及其形成的脉冲辐射场本身的特性和有关的特征量. 因此, 基于强流瞬态脉冲伽马辐射场射线探测, 开展反应时间和历史过程诊断已成为各类型脉冲辐射装置设计优化、探索相关物理规律必不可少的技术手段, 国内外的各种大型脉冲辐射装置普遍设置了强流脉冲伽马射线测量与诊断.

引用格式: 韩和同, 管兴胤, 卢毅. 强流瞬态脉冲辐射场伽马射线探测技术. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2023, 53: 272002

Han H T, Guan X Y, Lu Y. Intense gamma-ray detecting technology in the transient pulsed radiation field (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2023, 53: 272002, doi: [10.1360/SSPMA-2022-0436](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2022-0436)

强流脉冲伽马辐射场射线测量诊断技术主要包括探测技术、辐射及电磁屏蔽技术、信号传输与记录技术以及数据处理分析技术^[5]. 其中, 射线探测承担辐射转换和信号的建立与输出, 其性能参数决定着测量系统的主要技术指标, 也直接决定着测量方法的选择和测量数据的质量, 是诊断系统的关键部分. 本文从探测技术原理、探测器技术及其发展趋势等方面介绍强流脉冲伽马辐射场射线探测技术概况, 为脉冲辐射场测量诊断研究提供参考.

2 探测原理与方法

强流瞬态脉冲伽马射线测量诊断属辐射探测技术范畴. 强流探测中, 装置产生的伽马射线具有两个基本特征, 首先是脉冲持续时间短、强度范围大, 在纳秒到百纳秒时间尺度内射线强度可以达到20个数量级以上, 其次是出射伽马射线能量较高且具有能谱分布, 平均能量一般在MeV量级. 强流伽马射线的这些特点决定了探测器测量的对象是由大量入射粒子形成的脉冲信号, 主要研究脉冲强度曲线的形状、幅度和时间特征, 也就是通常意义上的电流型测量. 其测量诊断方法、技术途径和工程实现与普通的辐射探测技术有较大区别, 具有自己独特的理论体系和实验技术途径^[1,5,6], 测量实践中探测系统的一般设置和技术原理如图1所示. 脉冲装置出射的伽马射线经屏蔽准直后传输至射线探测器, 探测器将辐射能量转换为电信号, 通过传输与记录获取各探测器输出的电信号测量波形, 对信号波形进行数据分析处理, 得到关心的辐射场参数.

强流脉冲辐射场伽马射线探测中, 测量诊断系统

需要对强度范围跨十到二十多个数量级的射线进行全量程覆盖. 考虑到测量目标的超大范围, 受单一探测器线性范围限制, 需使用具有不同灵敏度特征的多种类型探测器, 组成探测器系统进行分布式的组合测量. 将不同灵敏度量程范围的测量信号进行时间或幅度关联, 从而得到从装置反应开始到结束的完整测量波形, 分析给出装置出射伽马射线强度随时间变化的全量程时间谱, 进而对辐射场特性和装置反应机理进行诊断.

这种大量程范围群探测器系统的分布式组合测量, 要求所使用的电流型探测器具有合适的探测灵敏度、宽广的线性动态范围、快速的时间响应、平坦或可分析的能量响应特性以及抗过载和抗辐射干扰能力, 在不能利用飞行时间来区分伽马射线和中子的测量场合, 还要求探测器具有一定的粒子分辨能力. 对具有这些特殊技术特征不同种类的探测器进行开发研制, 进而构建全量程测量诊断的技术能力, 是强流瞬态伽马辐射场探测技术研究的重要内容, 也是辐射探测技术研究工作领域的热点课题和发展的主要方向.

3 探测器技术

3.1 强流伽马探测器主要性能及其表述方法

(1) 探测灵敏度

探测器的电流灵敏度定义为, 在脉冲持续时间内的 t 时刻与给定粒子通量密度增量 $d\phi(t)$ 对应的输出电流增量 $dI(t)$, 即 $S(t)=dI(t)/d\phi(t)$, 单位为 $C\ cm^{-2}$. 有时也用能量灵敏度、剂量灵敏度以及照射量灵敏度等. 灵敏度和入射粒子的种类、能量、粒子入射角度、探测器工作状态及周围环境等因素有关. 在强流射线的电流

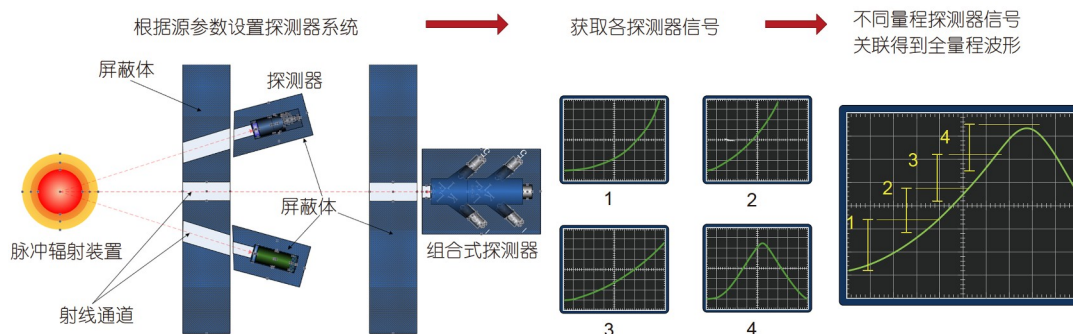


图1 (网络版彩图)强流伽马射线探测系统一般设置和技术原理示意

Figure 1 (Color online) General set-up and technical principles of intense gamma-ray detection system.

型测量中, 要求探测器的灵敏度不随时间变化, 即具有时不变特性. 因此, 采用输出电流定义探测灵敏度的前提是测量系统对输入脉冲波形的畸变可以忽略. 否则, 应对输出波形修复后才能得到正确的电流灵敏度值. 实际上, 探测器的其他特性也都对灵敏度特性产生影响.

(2) 探测器的幅度特性与线性动态范围

幅度特性是指探测器的输出电流与入射粒子能量密度之间的关系, 如图2所示. 在不考虑时间响应对幅度特性的影响时, 幅度特性曲线不同区域的斜率对应探测器在相应区域的灵敏度. 在幅度曲线的线性区域, 对应的灵敏度 S 值是不变的, 这个区域的上限、下限范围能够确保探测器不失真地传输输入的辐射脉冲, 区域范围即是探测器的线性动态范围.

严格地讲, 这样对应的电流上限是最大线性电流 $I_{\max}$. 但实际工作中, 总是在一定的不确定度要求下研究辐射脉冲的测量问题. 因此, 在不影响测量结果并在允许的不确定度范围情况下, 可以有一定的非线性. 非线性的表示方法是利用探测器的实际幅度特性曲线对理想特性直线的相对偏离, 即 $NL=\Delta I/I$. 通常取 NL 为0.05时的电流值为最大线性电流值. 探测器的测量下限, 首先取决于探测器及记录系统的灵敏度. 当粒子数目太少时, 测量的统计误差增大, 这时测量下限由测量的统计误差决定^[7]. 影响探测器测量下限的另一个重要因素是测量系统的本底. 这些本底有两类: 一种是静态性质的固有本底, 一种是在待测脉冲持续时间间隔附近的脉冲性质的干扰, 这些因素使探测器测

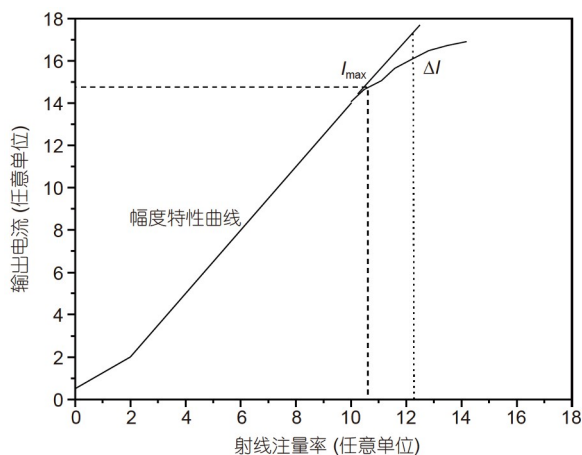


图2 探测器幅度特性曲线示意

Figure 2 Detector amplitude characteristic curve.

量的动态范围减小.

(3) 探测器的时间特性

脉冲射线探测器的时间特性, 决定着探测器能否以脉冲电流波形的形式准确地记录和传输脉冲辐射场的时间信息, 是探测器的关键参数之一. 有两种方法可以确定探测器的时间特性. 第一种方法是利用探测器的瞬态特性, 以探测器对阶跃脉冲输入的响应 $h(t)$ 表示. 一般情况下, 取探测器输出稳定值的0.1上升到0.9倍所需要的时间 $\tau_{0.1-0.9}$ 作为表征探测器时间响应的特征参数, 称为上升时间 t_r . 第二种方法是利用探测器的脉冲特性, 以探测器对输入为 δ 脉冲的响应 $g(t)$ 表示. 通常取以时间单位表示的输出电流脉冲半高度处的宽度 $\tau_{1/2}$ (FWHM), 即 $g(t)$ 函数半高宽作为探测器的时间特征参数. 在线性系统的情况下, 上述两种表述探测器时间特征的方法是相关的, 脉冲特性 $g(t)$ 比较直观.

由于各种探测器测量射线的机制及信号收集过程比较复杂, 探测器的时间特性很难用精确的数学表达式表示. 实际上使用的 $g(t)$ 是由实验测量得到的离散数据波形. 这种测量首先要有大量的粒子入射, 以保证测量的 $g(t)$ 有足够小的统计涨落. 如果用单粒子研究脉冲响应, 要求此单粒子在探测器中能够产生足够多的次级带电粒子. 满足粒子性要求的前提下, 还要求输入脉冲信号的时间特性比测量系统的时间特性要快(或窄)很多. 这样测量的 $g(t)$ 才能在测量不确定度范围内正确反映测量系统的时间特性. 通常情况下, 探测器的时间特性, 对灵敏度、幅度等基本特性都会产生影响. 在强流脉冲测量中, 一般要求待测辐射脉冲的时间半宽比探测器的时间响应半高宽大3倍以上.

(4) 探测器的能量响应特性

探测器的灵敏度与入射粒子的能量有关, 描述灵敏度和入射到探测器上的粒子能量依从关系的参数称为能量响应特性, 用 $S(E, t)$ 表示, E 表示入射粒子的能量, t 表示脉冲持续时间之内的时刻. 在脉冲时间谱测量中, 要求探测器对关心能谱范围内的粒子具有尽可能平坦的响应. 在未知待测能谱的情况下, 能谱响应特性是时间谱测量不确定度的主要贡献因素.

当已知入射能谱和探测器能谱响应特性时, 探测器在 t 时刻的灵敏度可表示为 $S(t) = \int_0^{E_{\max}} f(E, t) S(E, t) dE$, 式中 $f(E, t)$ 表示在脉冲持续时间内 t 时刻的脉冲能谱密度分布. 若在脉冲持续时间内, 入射粒子能谱不变,

探测器灵敏度可表示为 $S(t) = \int_0^{E_{\max}} f(E)S(E)dE$, 此时的灵敏度可以称为探测器能谱等效灵敏度.

(5) 探测器的粒子分辨能力

粒子分辨能力是指探测器在混合场中挑选出待测粒子的能力或对待测粒子与其他粒子的分辨能力(如 γ/n , n/γ 分辨), 包括阈值甄别能力. 当探测器接收的装置出射射线由多种辐射粒子组成时, 用于脉冲伽马射线探测的探测器需具有粒子分辨能力, 其定义为探测器伽马灵敏度与其他粒子灵敏度的比值. 探测器的粒子分辨能力与所分辨粒子的能量有关, 强流辐射探测中对探测器粒子分辨能力的要求, 与辐射场中待测信号与伴随粒子干扰信号的强度比值有关, 两者强度差异愈小, 对探测器的本征粒子分辨能力要求就愈高.

(6) “疲劳”特性和抗辐射过载能力

“疲劳”特性是指探测器长期保持灵敏度特性稳定的能力, 通常用探测器输出电流最大时, 最大允许的脉冲持续时间 $T_{\max}$ 来表示. 在这个最大允许时间内, 脉冲过程中和结束时探测器的灵敏度不会降低. 当在较大的本底下测量小幅度脉冲或者在前一个幅度大的脉冲后沿上测量小幅度脉冲时, 疲劳特性对探测器选型至关重要. 过载能力是指通量密度超过最大线性电流对应的通量密度值许多倍的辐射脉冲作用之后, 探测器仍能恢复正常灵敏度的能力. 在数值上, 一般是用最大允许过载系数来描述探测器的过载特性. 抗辐射性能是指当探测器在射线作用时间内及作用以后, 在规定的指标限度内整体上保持正常特性的能力. 在数值上, 以通过探测器灵敏体积的最大允许射线粒子积分通量或最大剂量率响应值来表示. “疲劳”特性、过载能力和抗辐射性能是探测器的极限特性, 一般需要做“破坏”实验才能得到特征参数值. 通常情况下, 只需要考察探测器的线性范围. 在应用时, 不超过这个范围, 就能保证测量结果的有效性.

就探测原理和探测系统的一般设置而言, 强流脉冲伽马射线探测中还需关注探测器在群探测中的兼容性、工作条件的依赖性等其他非辐射探测特性^[5,8]. 概括地讲, 探测器的这些基本特性, 决定着探测器的适用范围, 也是辐射探测首先要研究的内容. 强流脉冲伽马探测器的选择, 就是根据这些基本特性以及定义的测量内容与范围, 在考虑测量不确定度和测量效费比的情况下综合进行.

3.2 强流应用的脉冲伽马探测器类型

基于强流脉冲伽马辐射场特征、探测原理、探测系统一般设置以及上述对探测器基本性能和特性的描述, 强流脉冲伽马探测可选的探测器主要有两大类.

第一类是能量沉积型探测器或称光电耦合类探测器. 利用伽马射线与闪烁体、切连科夫辐射体或其他能量沉积器件(通常为辐射转换体)相互作用产生次级电子进而诱发光信号, 配合光电转换器件将光信号转换为电信号输出, 对脉冲射线进行探测. 用于发光的能量沉积器件的光产额一般为每单位沉积能量(MeV)约数千至数万个光子, 匹配的光电转换器件可以实现对光信号的有效传输或放大, 这类探测器可将伽马射线和发光器件相互作用的事件信息放大至数百mV-V量级, 灵敏度调节范围接近十个数量级, 被广泛应用于强流脉冲辐射探测.

第二类是电荷收集型探测器, 利用辐射致电原理, 收集射线与物质相互作用产生次级带电粒子电荷. 此类探测器直接记录入射伽马射线产生的次级带电粒子电荷形成的脉冲电信号, 一般不存在中间变换过程. 电荷收集型探测器可分为集电型(又细分为电子发射型和电子收集型)和感应型两类. 集电型探测器依据次级电荷逸出引起物体宏观电势变化或直接收集次级粒子电荷形成电流输出. 感应型探测器利用电流感生原理由一个位于辐射接受体附近的被绝缘的电极感生脉冲辐射接受体上形成的次级带电粒子流形成电流输出. 电荷收集型探测器具体结构随测量目的和用途有很多具体的结构和形式. 最简单又经常应用的集电型探测器是法拉第筒(F.C.), 感应型探测器是罗戈夫斯基圆带. 这两种探测器由于其灵敏度、能量响应、线性范围和抗干扰能力上的缺陷, 通常情况下不适宜于强流脉冲伽马辐射场测量场合. 由于伽马射线与物质相互作用的康普顿截面一般在 10^{-24} cm^2 数量级, 强流探测中使用的电荷收集型探测器主要是直接收集伽马射线与物质相互作用产生电子电流的康普顿二极管. 此类探测器具有灵敏度低、动态范围大、响应速度快, 在很宽的伽马射线能量范围内能量响应比较平坦等特点, 是强流伽马射线高量程探测中理想的探测器件.

另一种电荷收集型的集电式探测器是电流型半导体探测器. 利用射线与半导体原子发生作用产生的次级带电粒子在耗尽层内产生的电子-空穴对, 被电极收

集后形成脉冲电信号输出. 半导体探测器本质上是一种固体电离室, 常用于带电粒子如电子、质子的探测, 当伽马射线贯穿半导体器件时, 通过光电效应和康普顿效应等产生电子, 电子继而通过电离作用产生电子空穴对, 在电场作用下向两极运动产生电流. 常见的半导体探测器有面垒型、扩散结型、锂漂移型等. 双扩散硅(PIN)结构是最通用的电流型半导体探测器, 这种半导体探测器的灵敏度在 $10^{-16} \text{ C cm}^2 \text{ MeV}^{-1}$ 量级, 时间响应 10 ns 量级, 线性范围可以达到安培数量级. 其缺点是后沿响应较慢, 且具有较大的暗电流, 一般用作强流脉冲伽马射线探测的辅助器件.

当然, 也可以采用某种特定的探测结构探测经一定靶物质散射的次级辐射(散射伽马或散射电子)的方式来实现强流脉冲伽马探测的目的^[9], 其探测实质与上述探测器探测原理是一致的, 由于存在受环境辐射干扰影响较大的先天不利因素, 一般较少采用.

以上介绍的探测器是强流脉冲辐射测量中经常关注的探测器件, 在一些特殊应用场合这些探测器会呈现出不同的具体形态, 需要根据具体应用问题进行选择并设计恰当的探测结构.

4 探测器技术发展概况及趋势

4.1 探测器技术发展概况

射线探测的一般方法是利用某种特定的效应物质将射线能量转换为可观测的信号. 粒子性是伽马射线的主要表现. 伽马光子与效应物质原子相互作用时, 能量的转换可以有多种方式, 大体上可分为与原子的核外电子作用和与原子核发生的作用. 与核外电子的作用方式有相干散射(或称汤姆逊散射)、光电效应、康普顿效应. 与原子核作用的方式有电子对效应、光致核反应、核共振反应. 当伽马光子的能量在 100 keV – 30 MeV 范围内时, 光电效应、康普顿效应和电子对效应是三种主要的相互作用方式. 伽马探测器的研制就是根据这些效应的基本作用截面, 利用不同的转换物质及其组合或特殊的探测几何结构, 开发适合不同能量或强度范围射线探测装置的技术过程.

能量沉积型光电耦合探测器 闪烁探测器是强流伽马射线探测中最常用的能量沉积型光电耦合类探测器, 研究起步较早, 直接从闪烁计数器发展过渡而来, 由闪烁体(辐射转换体)和光电器件如光电管、光电倍

增管、微通道板光电倍增管等组成. 由于物质材料的结构、密度和等效原子序数可以在很大的范围内变化, 这种探测器具有较强的伽马射线能量沉积本领、发光效率、衰减时间和射线甄别能力. 闪烁体可以分为有机闪烁体、无机闪烁体以及气体闪烁体. 有机闪烁体的光产额较低但发光时间短, 特别是塑料有机闪烁体, 发光光谱范围适当, 具有纳秒级的发光时间、良好的机械性能和对环境条件不敏感等优点, 是脉冲射线探测中最常用的闪烁体. 在聚苯类有机物如聚苯乙烯(C_8H_8)、聚乙烯甲苯(C_9H_{10})等中加入不同的移波或淬灭物质, 可以改善发光光谱, 提高有机闪烁体的时间性能和发光效率, 能够发展出具有不同发光效率和性能的辐射转换体, 如ST401, BC422Q, EJ200系列等. 无机类闪烁晶体具有较高的物质密度, 伽马射线转换效率较高且不含中子截面较大的氢原子, 能够在伽马中子混合场中实现射线的分辨测量. 但多数无机闪烁晶体如计数型探测器中常用的NaI, $\text{Bi}_4\text{Ce}_3\text{O}_{12}$, BGO, 以及后期发展的钇镧铈稀土卤化物、氧化物闪烁晶体等, 发光衰减时间在百纳秒以上, 限制了其在脉冲射线测量中的应用. 20世纪90年代以来, 随着固体物理理论研究的深入和人工晶体材料技术、生长工艺的迅速发展, 通过稀土掺杂和滤光分辨技术, 无机晶体的时间特性和发光光谱特性得到有效改善, 基于无机闪烁体(如LSO, PbWO_4 , CeF_3 等)的射线探测器已在强流射线探测中得到成功应用. 表1给出了常用闪烁体的主要性能^[10–16], 配合具有不同阴极量子效率、透射光谱和放大倍数的光电转换器件, 发展出的闪烁探测器灵敏度可以在 10^{-9} – $10^{-19} \text{ C cm}^2 \text{ MeV}^{-1}$ 范围内调节, 时间响应从 ns 到几十 ns , 线性动态范围可以达到3个数量级, 并且在 10^{18} – $10^{20} \text{ MeV s}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ 测点通量条件下不发生非线性的剂量响应, 能够实现测点注量率在 $10^{20} \text{ MeV s}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ 以下的强流伽马射线探测.

为改善探测器的时间响应性能而发展的另一种能量沉积型光电耦合类探测器, 是切连科夫探测器, 由切连科夫辐射体和接收切连科夫光子的光电器件组成. 在切连科夫辐射体中, 速度超过介质光速的电子放射出切连科夫光, 光子通过光电器件转换成电信号. 常见的切连科夫辐射体有固态的有机玻璃、铅玻璃, 液态的水、甘油和苯, 气态的氮、 CO_2 、空气、氟利昂等. 切连科夫探测器具有很快的时间响应特性, 可以达到亚纳秒量级. 强流伽马射线探测中发展比较成熟

表 1 常用闪烁体主要性能

Table 1 Key properties of commonly used scintillators

性能	有机类闪烁体	NaI(Tl)	BGO	CsI(Tl)	LSO	PWO	CeF ₃	BaF ₂
密度(g cm ⁻³)	1.03	3.67	7.13	4.51	7.35	8.28	6.16	4.88
辐射长度(cm)	40	2.59	1.12	1.85	0.88	0.87	1.70	2.10
潮解性	无	大	无	轻微	无	无	无	轻微
发光波长(nm)	370–400	410	480	530	420	450/420	340/310	325/220/195
衰减时间(ns)	0.1–2.0	230	300	1000	40	36/10	30/9	630/0.6
相对光输出	1–25	100	9–15	45–50	70	0.3/0.2	6.6/2.0	20/4
折射率	1.58	1.85	2.15	1.80	1.82	2.16	1.62	1.58

的是利用容易制备的固体辐射体(如有机玻璃)直接配合光电器件构成的光电耦合探测器, 其与光电管配合的灵敏度在 $10^{-19} \text{ C cm}^2 \text{ MeV}^{-1}$ 量级.

电荷收集型康普顿探测器 当到达测点的射线注量率达到 $10^{20} \text{ MeV s}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ 以上时, 受闪烁体、辐射转换体剂量率响应上限和光电转换器件最大线性电流的限制, 能量沉积型光电耦合类探测器很难实现更高强度的强流脉冲伽马探测, 电荷收集型的康普顿探测器成为强流伽马射线探测的主要器件. 康普顿探测器起源于伽马辐射激发的前向康普顿电子会在金属电极上引起可观测电流的思想^[17]. 当伽马射线贯穿导体靶板时, 发生光电效应、康普顿效应和电子对效应, 靶板表面将有电子射出使其电位发生变化, 直接记录与导体靶板相连接的负载 R_L 上的电压波形, 由测量波形与入射伽马射线特性的关系, 能够得到伽马射线的注量、能量等信息. 或者利用对伽马射线能量全吸收的导体物质, 收集射线与前向物质(导体或非金属)作用出射的电子使吸收导体电位发生改变, 亦能达到探测伽马射线的目的. 对MeV量级的伽马射线来讲, 引起回路电流的电子主要是康普顿电子, 因此称这种探测器为康普顿探测器.

概括地讲, 直接利用康普顿电流进行射线探测的强流探测器主要有两种类型: 电子发射型的真空康普顿探测器(VCD)和电子收集型的介质康普顿探测器(DCD). 一般来讲, 收集型的介质康普顿探测器比发射型的真空康普顿探测器具有更高的伽马射线探测效率, 且结构简单、易于加工和使用. 但是, 由于介质在强流伽马射线作用下易发生极化、击穿效应, 这种探测器能够测量的伽马射线强度上限受到较大的限制. 同时, 较厚的收集极对伽马射线产生强烈的吸收和散

射作用, 收集型探测器不宜在多量程范围群探测器测量中大量使用. 在高强度特殊环境的强流射线探测中, 改进探测结构, 提升探测性能的研究, 主要关注发射型的真空康普顿探测器. 真空康普顿比介质康普顿具有更大的线性动态范围、更快的时间响应和更高的伽马/中子分辨能力, 且对辐射场的影响较小, 适宜于全量程范围探测的分布式群探测器测量场合. 利用具有不同电子出射效率的导体物质及其组合, 或进行特定的探测结构设计. 目前发展的康普顿探测器灵敏度在 $10^{-20} \sim 10^{-21} \text{ C cm}^2 \text{ MeV}^{-1}$, 时间响应在百皮秒量级, γ/n 分辨30–50倍^[6,18–22].

4.2 发展趋势

历经数十年的发展, 强流脉冲伽马辐射场射线探测技术已形成比较完善的技术体系. 利用不同的射线转换物质及其组合或特殊的探测几何结构, 开发出的适合不同能量或强度范围的射线探测装置(探测器), 基本实现了强流辐射场十数个量级伽马射线不间断的全量程探测诊断, 表2给出了目前发展的强流伽马探测器的一些综合性能.

随着核科学技术和强流辐射源技术的发展, 各种超高强度超快脉冲的强流装置相继涌现, 应用领域和应用水平不断拓展提高, 对强流伽马射线的探测需求和测量诊断精度要求不断提升, 目前发展的各型探测器在一些关键性能和综合指标方面还不能满足实际需要. 多数探测器难以兼顾高灵敏和快时间响应, 灵敏度、线性动态范围、抗干扰能力、性能稳定性等方面还不能适应全量程射线测量诊断工作. 研发不同灵敏度范围的高性能探测器, 拓展各型探测器的探测效率、灵敏度范围、线性范围、时间响应等强流应用的

表 2 强流伽马探测器的综合性能

Table 2 Comprehensive performance of intense gamma-ray detectors

探测器	典型灵敏度范围 ($\text{C cm}^{-2} \text{ MeV}^{-1}$)	脉冲时间响应	最大射线注量率 ($\text{MeV cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$)	γ/n 分辨	最大线性电流 (A)
有机闪烁	10^{-10} – 10^{-18}	亚ns–ns	10^{20} – 10^{21}	0.5–1	0.1–15
无机闪烁	10^{-9} – 10^{-19}	几十ns	10^{18} – 10^{20}	5–10	0.1–15
切连科夫	10^{-17} – 10^{-20}	亚ns–ns	10^{19} – 10^{21}	5–20	0.1–15
半导体	10^{-15} – 10^{-16}	ns–几十ns	10^{17} – 10^{18}	~几倍	~1
康普顿	10^{-20} – 10^{-21}	亚ns	10^{22} – 10^{23}	30–50	100

关键技术指标, 成为强流伽马辐射场探测技术研究工作的热点课题.

在闪烁探测器研究方面, 目前关注的焦点是更快时间响应、更高光产额的新型闪烁体生长研制、更快时间响应更高增益的光电器件设计研制、闪烁体与辐射相互作用的各种效应机理研究等. 无机晶体具有较高的伽马射线探测本领, 光产额高但发光衰减时间较长, 研究表明, $\text{LaBr}_3/\text{Cl}_3$ ^[23–25]具有很高的光产额(相对产额达150), 发光衰减时间和光谱范围适中, 适宜于研制高灵敏的伽马探测器; BaF_2 , Yb:YAG , ZnO 等晶体具有亚纳秒发光的快成分, 利用稀土掺杂、滤光移波、制作光子晶体或表面微结构等^[26–28]技术, 在亚纳秒快时间响应伽马探测器研制方面呈现出良好的态势. 另外, 国内外有学者研究制备有机-无机杂化闪烁材料、钙钛矿复合物/聚合物等新型闪烁材料^[29–31], 希望能兼顾有机晶体和无机晶体的优点, 同时实现快响应和高分辨探测.

在光电转换器件研究方面, 数十皮秒响应的微通道板光电倍增管已发展出成熟的商用产品, 其缺点是有效电荷量较低, 还不能兼顾快脉冲射线大范围探测, 利用阵列技术的大面积高线性MCP及其应用技术有望在近期发展成熟. 采用时空变换技术的条纹相机具有良好的时间分辨能力, 目前的商用产品时间响应可达到10 ps量级, 但条纹相机本身没有信号倍增放大能力, 匹配条纹相机的探测器无法保证高灵敏探测, 且存在动态范围小、成本高等问题. 利用时间拉伸技术研制光电耦合类探测器可以同时具有高信号增益和快时间响应, 但高性能的时间拉伸漂移管技术路径复杂, 研制难度大, 目前只有一些文献报道^[32,33], 其技术也还在进一步的发展中.

在切连科夫探测器研究方面, 由于辐射介质发射

切连科夫光的时间在 10^{-11} s数量级, 切连科夫探测器具有很快的时间响应, 并且只有当电子的能量超过介质中光速时, 介质才能发出切连科夫光子, 因而切连科夫探测器对探测的伽马射线具有阈能选择特性, 有学者使用二氧化碳、氟利昂等气体设计特殊的探测几何结构对ICF装置出射的高能伽马射线进行爆炸反应时间和射线时间谱测量^[34–37], 进而诊断聚变特性. 但切连科夫辐射体发光通常存在慢成分, 其慢成分不是切连科夫光, 而是荧光, 如何对切连科夫辐射体发光成分进行有效选择还有待进一步的研究. 另外, 切连科夫探测器的时间响应取决于辐射体发光时间和光从辐射体内输运至光收集器件的时间分散, 改进探测结构提高光收集效率、减少时间分散性的工作也是研究关注的重点方向.

在康普顿探测器设计研究方面, 目前关注的焦点是如何进一步提升探测效率, 拓展探测器的应用范围, 以及利用现代电磁场模拟软件准确评估空间电荷限制电流, 进一步改进探测结构, 发展更快时间响应、更高线性范围的同轴型探测器. 近年来, 基于二次电子发射现象的各种低能电子倍增器件和材料迅猛发展, 尤其是逸出深度达到微米量级的负电子亲和势材料的制备工艺日趋成熟, 初步具备了将中高能电子的数目进行高增益倍增放大的条件^[38–44]. 利用二次电子发射原理, 基于负电子亲和势材料, 促使MeV级伽马射线诱发次级电子激励逸出数目更多的二次电子, 有望将康普顿探测器的探测效率实现数量级的提升.

随着半导体技术的发展, 禁带宽度和制作工艺水平的提高, 电流型半导体探测器在强流伽马探测中也呈现出良好的应有前景. 文献^[45,46]探讨了利用亚禁带光照优化电流型碲锌镉半导体探测器性能的可行性, 以期改善半导体探测器对贯穿辐射的时间响应和

伽马灵敏度. 另外, 一些新的原理和方法也还在进一步的发展和尝试之中, 如基于半导体折射率调制的脉冲伽马探测技术、基于激光偏振调制的“辐射-光”探测技术等, 利用射线在半导体内产生非平衡自由载流子引起半导体折射率变化, 通过测量折射率随时间的变化, 实现射线束强度的时间分辨测量, 美国利弗莫尔国家实验室的学者实现了 8 keV 射线的高时间分辨测量^[47]. 设计针对 MeV 脉冲射线的增敏措施, 使用高时间分辨记录技术^[48], 基于该原理可探索脉冲伽马射线高时间分辨测量技术^[49], 有望发展出亚 10 ps 响应的超快伽马射线探测装置.

5 总结与展望

脉冲辐射场伽马射线探测是诊断强流脉冲辐射装置工作状态、辐射产生物理机制和过程规律信息的主要途径之一, 也是各型辐射装置设计优化、运行监测与控制以及辐射场应用研究不可缺少的技术手段. 本

文从探测技术原理、探测器技术及其发展等方面介绍了强流脉冲伽马辐射场射线探测技术概况, 为脉冲辐射场测量与诊断研究提供借鉴与参考. 随着强流脉冲辐射源技术的发展以及在科学研究、工业生产和国防中的应用, 脉冲伽马辐射场探测技术正朝着超快、超强、超高灵敏的方向发展.

强流瞬态伽马辐射场射线探测技术发展涉及固体物理、材料物理、半导体物理、电子学、机械工艺等多方面的学科和技术, 其目的是研发不同灵敏度范围各型探测装置, 拓展各型探测器的探测效率、灵敏度范围、线性范围、时间响应等强流应用的关键技术指标. 强流脉冲伽马探测器研制是一项原创性、探索性很强的工作, 利用现代科学与技术手段, 探索新的探测方法与技术手段, 发展更高性能的探测器件, 建立系列不同辐射强度、射线能量和脉冲宽度的脉冲伽马射线探测装置, 对提高强流瞬态脉冲辐射场伽马射线测量与诊断技术水平具有重要的基础性作用, 也是脉冲辐射探测领域研究工作努力的重要方向.

参考文献

- 1 Lv M. Pulsed radiation detection (in Chinese). Nucl Elec Detect Tech, 1984, 4: 321–328 [吕敏. 脉冲射线束探测技术. 核电子学与探测技术, 1984, 4: 321–328]
- 2 Lv M. Pulsed radiation detection (in Chinese). Nucl Elec Detect Tech, 1985, 5: 11–15 [吕敏. 脉冲射线束探测技术(续). 核电子学与探测技术, 1985, 5: 11–15]
- 3 Liu Q Z. Physical diagnosis of transient pulse radiation characteristics (in Chinese). Nucl Phys Rev, 1995, 12: 41–43 [刘庆兆. 瞬态脉冲辐射特性物理诊断. 核物理动态, 1995, 12: 41–43]
- 4 Ouyang X P. Development of pulsed radiation detection technology (in Chinese). Strateg Study CAE, 2008, 10: 44–53 [欧阳晓平. 脉冲辐射探测技术. 中国工程科学, 2008, 10: 44–53]
- 5 Liu Q Z. Pulsed Radiation Field Diagnostic Techniques (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]
- 6 May M, Clancy T, Fittinghoff D, et al. Reconstitution of Low Bandwidth Reaction History UCRL-TR-210578. Lawrence Livermore National Laboratory, 2005
- 7 Zhu R Y. Fast crystal scintillators for future HEP experiments (in Chinese). J China Univ Metrol, 2014, 25: 107–121 [朱人元. 快速闪烁晶体在未来高能物理实验中的应用. 中国计量学院学报, 2014, 25: 107–121]
- 8 Ouyang X P. Detectors for pulsed neutron and gamma-ray measurement (in Chinese). Strate Study CAE, 2009, 11: 46–55 [欧阳晓平. 脉冲中子、伽马探测系统性能表征与设计技术. 中国工程科学, 2009, 11: 46–55]
- 9 Xia L B. Scintillation Techniques for Pulsed Gamma Detection with Scattered Electron Method (in Chinese). Dissertation for Doctoral Degree. Beijing: Tsinghua University, 2008 [夏良斌. 基于散射电子的脉冲伽马闪烁探测技术研究. 博士学位论文. 北京: 清华大学, 2008]
- 10 Wang J, Chen B X, Zhuang R L. Inorganic scintillation detectors (in Chinese). Nucl Elec Detect Tech, 2006, 26: 1039–1045 [汪婧, 陈伯显, 庄人遵. 无机闪烁探测器综述. 核电子学与探测技术, 2006, 26: 1039–1045]
- 11 Li X K, Qiu G M, Qiu T, et al. Progress in scintillator research (in Chinese). J Chin Rare Earth Soc, 2005, 23, spec issue [李喜坤, 邱关明, 丘泰, 等. 闪烁材料研究进展. 中国稀土学报. 2005, 23, 特刊]
- 12 Zhu R Y. Fast crystal scintillators for future HEP experiments (in Chinese). J China Univ Metrol, 2014, 25: 107–121 [朱人元. 快速闪烁晶体在

未来高能物理实验中的应用. 中国计量学院学报, 2014, 25: 107–121]

- 13 Tang Q, Zhao Z Q, Su M, et al. Performance calculation of ultra fast neutron scintillator (in Chinese). *High Power Laser Particle Beams*, 2010, 22: 1243–1246 [唐琦, 赵宗清, 苏明, 等. 超快中子探测器闪烁体性能计算. *强激光与粒子束*, 2010, 22: 1243–1246]
- 14 Valbis Y A, Rachko Z A, Yansons Y L. Short-wave UV luminescence of BaF₂ crystals caused by crossover transition. *JETP Lett*, 1985, 42: 172–174
- 15 Kubota S, Kanai N, Ruan J. Fine structure of the fast luminescence component from BaF₂ crystal excited by fast electrons. *Phys Stat Sol (B)*, 1987, 139: 635–639
- 16 Li P J. Scintillation Properties and characterization of barium fluoride crystals (in Chinese). *J Inorg Mater*, 1995, 10: 265–271 [李培俊. 氟化钡晶体闪烁特性与表征. *无机材料学报*, 1995, 10: 265–271]
- 17 Gross B. Compton dosimeter for measurement of penetrating X-rays and gamma rays. *Radiat Res*, 1961, 14: 117
- 18 Ebert P J, Lauzon A F. Vacuum diode detector for measuring high intensity gamma-ray flux. *Rev Sci Inst*, 1967, 38: 1747–1752
- 19 Hsu H H, Lee H. Monte Carlo calculations of the vacuum Compton detector sensitivities. *IEEE Trans Nucl Sci*, 1989, 36: 1926–1930
- 20 Drumm C R, Hohlfelder J J, Kotulski J D, et al. Efficient modeling of compton diode gamma radiation detectors. *IEEE Trans Nucl Sci*, 1992, 39: 584–589
- 21 Han H T, Wang Q S, Xia L B, et al. Design and gamma sensitivity measurement of a novel dual-emitter vacuum Compton detector. *Chin Phys B*, 2009, 18: 4777–4780
- 22 Han H T. New Techniques for Gamma Ray Detection Based on Compton Effect (in Chinese). Dissertation for Doctoral Degree. Xi'an: Xi'an Jiaotong University, 2009 [韩和同. 基于康普顿效应的新型伽马射线探测技术研究. 博士学位论文. 西安: 西安交通大学, 2009]
- 23 van Loef E V D, Dorenbos P, van Eijk C W E, et al. High-energy-resolution scintillator: Ce³⁺ activated LaCl₃. *Appl Phys Lett*, 2000, 77: 1467–1468
- 24 van Loef E V D, Dorenbos P, van Eijk C W E, et al. High-energy-resolution scintillator: Ce³⁺ activated LaBr₃. *Appl Phys Lett*, 2001, 79: 1573–1575
- 25 Lu Y. Establishment and Performance Study of LaBr:Ce Gamma Radiation Detection System (in Chinese). Dissertation for Doctoral Degree. Beijing: Peking University, 2020 [卢毅. 基于溴化镧的伽马辐射探测系统建立及性能研究. 博士学位论文. 北京: 北京大学, 2020]
- 26 Han H, Zhang Z, Weng X, et al. Development of a fast radiation detector based on barium fluoride scintillation crystal. *Rev Sci Inst*, 2013, 84: 073503
- 27 Zhang K, Hu H, Song Z, et al. Experiment investigation on pulsed gamma-ray fluence rate effect on Yb-doped yttrium aluminum garnet scintillator. *Rev Sci Inst*, 2021, 92: 063304
- 28 Hu C, Zhang L, Zhu R Y, et al. BaF₂:Y and ZnO:Ga crystal scintillators for GHz hard X-ray imaging. *Nucl Instrum Methods Phys Res Sect A*, 2020, 950: 162767
- 29 Xia L B, Ouyang X P, Wang Q S, et al. Lead-tin-fluorophosphates scintillating glass doped with stilbene 420 excited by gamma ray (in Chinese). *Acta Phys Sin*, 2009, 58: 882–886 [夏良斌, 欧阳晓平, 王群书, 等. 掺杂有机染料的铅锡氟磷酸闪烁玻璃及其在伽马激发下的发光. *物理学报*, 2009, 58: 882–886]
- 30 Zhu M Q, Wen H, Wang B, et al. Research progress of perovskite-type scintillation crystals (in Chinese). *J Syn Crystals*, 2021, 50: 1844–1857 [朱梦淇, 温航, 王彪, 等. 钙钛矿型闪烁晶体的研究进展. *人工晶体学报*, 2021, 50: 1844–1857]
- 31 Wang W. Preparation of One-Dimensional Organic-inorganic Lead Halide Perovskite and Application of Photodetector (in Chinese). Dissertation for Master's Degree. Nanchang: Nanchang University, 2021 [王伟. 一维有机-无机卤化铅钙钛矿的制备及光电探测器应用. 硕士学位论文. 南昌: 南昌大学, 2021]
- 32 Hilsabeck T J, Hares J D, Kilkenny J D, et al. Pulse-dilation enhanced gated optical imager with 5 ps resolution (invited). *Rev Sci Inst*, 2010, 81: 10E317
- 33 Gales S G, Horsfield C J, Meadowcroft A L, et al. Characterisation of a sub-20 ps temporal resolution pulse dilation photomultiplier tube. *Rev Sci Inst*, 2018, 89: 063506
- 34 Herrmann H W, Mack J M, Young C S, et al. Cherenkov radiation conversion and collection considerations for a gamma bang time/reaction history diagnostic for the NIF. *Rev Sci Inst*, 2008, 79: 10E531
- 35 Herrmann H W, Kim Y H, McEvoy A M, et al. Next generation gamma-ray Cherenkov detectors for the National Ignition Facility. *Rev Sci Inst*, 2016, 87: 11E732

- 36 Guan X Y. Study on Suppression Technology for Accompanying Light Background in the Fusion Gamma Gas Cherenkov Detector (in Chinese). Dissertation for Doctoral Degree. Xi'an: Xi'an Jiaotong University, 2017 [管兴胤. 聚变伽马气体切连科夫探测器伴生光本底抑制技术研究. 博士学位论文. 西安: 西安交通大学, 2017]
- 37 Liu B, Hu H, Han H, et al. Optimization of the design of gas Cherenkov detectors for ICF diagnosis. *Nucl Instrum Methods Phys Res Sect A*, 2018, 897: 54–58
- 38 Furman M A, Pivi M T. Probabilistic model for the simulation of secondary electron emission. *Phys Rev ST Accel Beams*, 2022, 5: 124404
- 39 Chang B K. Negative electron affinity photocathode of fifty years (in Chinese). *Infrared Technol*, 2015, 37: 801–806 [常本康. 负电子亲和势光电阴极50年史话. *红外技术*, 2015, 37: 801–806]
- 40 Qiao J L, Chang B K, Du X Q, et al. Quantum efficiency decay mechanism for reflection-mode negative electron affinity GaN photocathode (in Chinese). *Acta Phys Sin*, 2010, 59: 2855–2859 [乔建良, 常本康, 杜晓晴, 等. 反射式负电子亲和势GaN光电阴极量子效率衰减机理研究. *物理学报*, 2010, 59: 2855–2859]
- 41 Machuca F, Liu Z, Sun Y, et al. Oxygen species in Cs/O activated gallium nitride (GaN) negative electron affinity photocathodes. *J Vac Sci Technol B*, 2003, 21: 1863
- 42 Horton J R, Tasker G W, Foul J J. Characteristics and applications of advanced technology microchannel plates. In: Conference on Sensor Fusion. Orlando: SPIE, 2012. 169–178
- 43 Vaz R, May P W, Fox N A, et al. Measurement of the secondary electron emission from CVD diamond films using phosphor screen detectors. *J Inst*, 2015, 10: P03004
- 44 Insepov Z, Ivanov V, Frisch H. Comparison of candidate secondary electron emission materials. *Nucl Inst Methods Phys Res Sect B*, 2010, 268: 3315–3320
- 45 Chen X, Song Z H, Lu Y, et al. Improvement on the temporal response of CZT γ -ray detector by infrared illumination. *IEEE Trans Nucl Sci*, 2021, 68: 2533–2538
- 46 Chen X, Zhang K, Hao S, et al. Atomic energy science and technology (in Chinese). *Atom Energy Sci Technol*, 2022, 56: 387–393 [陈翔, 张侃, 郝帅, 等. 电流型碲锌镉探测器伽马灵敏度性能优化. *原子能科学技术*, 2022, 56: 387–393]
- 47 Vernon S P, Lowry M E, Baker K L, et al. X-ray bang-time and fusion reaction history at picosecond resolution using Radoptic detection. *Rev Sci Inst*, 2012, 83: 10D307
- 48 Hernandez V J, Bennett C V, Moran B D, et al. 104 MHz rate single-shot recording with subpicosecond resolution using temporal imaging. *Opt Express*, 2013, 21: 196–203
- 49 Peng B D, Song Y, Sheng L, et al. Validation of radiation detecting technology based on refractive index modulation (in Chinese). *High Power Laser Particle Beams*, 2014, 26: 114005 [彭博栋, 宋岩, 盛亮, 等. 折射率调制脉冲射线探测技术原理验证. *强激光与粒子束*, 2014, 26: 114005]

Intense gamma-ray detecting technology in the transient pulsed radiation field

HAN HeTong, GUAN XingYin & LU Yi^{*}

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

A major method to obtain the characteristic information about equipment with transient pulse radiation is to detect the gamma rays released from the equipment. To explore the performances of the equipment, sophisticated diagnostic techniques and detecting systems have been developed and established. The detecting system serves as the main instrumentation for gathering details about radiation fields. It also serves as the technological basis for carrying out intense pulsed radiation detection, and its performance directly influences the selection of the measurement technique and the quality of the measured data. The detection principle, detector technology, and development situation of intense pulsed gamma rays are discussed in this study.

gamma ray, intense radiation, detecting technology

PACS: 07.85.-m, 29.40.-n, 43.20.Px

doi: [10.1360/SSPMA-2022-0436](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2022-0436)