



上海激光电子伽马源(SLEGS)核共振荧光谱仪设计及探测器性能分析

匡攀 宋龙龙 陈开杰 王宏伟 刘龙祥 范功涛 许杭华 胡新荣 李鑫祥 郝子锐 杨宇萱 金晟

Nuclear Resonance Fluorescence Spectrometer Design and Detector Performance Analysis of Shanghai Laser Electron Gamma Source(SLEGS)

KUANG Pan, SONG Longlong, CHEN Kaijie, WANG Hongwei, LIU Longxiang, FAN Gongtao, XU Hanghua, HU Xinrong, LI Xinxiang, HAO Zirui, YANG Yuxuan, JIN Sheng

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.40.2022040>

引用格式:

匡攀, 宋龙龙, 陈开杰, 王宏伟, 刘龙祥, 范功涛, 许杭华, 胡新荣, 李鑫祥, 郝子锐, 杨宇萱, 金晟. 上海激光电子伽马源(SLEGS)核共振荧光谱仪设计及探测器性能分析[J]. *原子核物理评论*, 2023, 40(1):58-65. doi: 10.11804/NuclPhysRev.40.2022040

KUANG Pan, SONG Longlong, CHEN Kaijie, WANG Hongwei, LIU Longxiang, FAN Gongtao, XU Hanghua, HU Xinrong, LI Xinxiang, HAO Zirui, YANG Yuxuan, JIN Sheng. Nuclear Resonance Fluorescence Spectrometer Design and Detector Performance Analysis of Shanghai Laser Electron Gamma Source(SLEGS)[J]. *Nuclear Physics Review*, 2023, 40(1):58-65. doi: 10.11804/NuclPhysRev.40.2022040

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

上海激光康普顿散射伽马源的发展和展望

Development and Prospect of Shanghai Laser Compton Scattering Gamma Source

原子核物理评论. 2020, 37(1): 53-63 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.37.2019043>

中国散裂中子源小角中子散射谱仪探测器研制

Small Angle Neutron Scattering Spectrometer Detector of China Spallation Neutron Source

原子核物理评论. 2019, 36(2): 204-210 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.36.02.204>

高精度环形谱仪等时性模式的闭轨校正模拟

Closed Orbit Correction for the Isochronous Mode of Spectrometer Ring

原子核物理评论. 2019, 36(4): 419-425 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.36.04.419>

用于GPPD谱仪的大面积闪烁体中子探测器性能测试

Performance Test of the Array Scintillator Detector with a Large Area for GPPD

原子核物理评论. 2019, 36(2): 190-196 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.36.02.190>

中国极化电子离子对撞机探测器设计

Detector Design of the Polarized Electron Ion Collider in China

原子核物理评论. 2020, 37(3): 727-733 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.37.2019CNPC37>

CEE-TPC中GEM读出探测器传输性能实验研究

Experimental Research on Transmission Performance of GEM Readout Detector in CEE-TPC

原子核物理评论. 2020, 37(3): 765-770 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.37.2019CNPC46>

文章编号: 1007-4627(2023)01-0058-08

上海激光电子伽马源 (SLEGS) 核共振荧光光谱仪设计及探测器性能分析

匡攀^{1,2}, 宋龙龙^{3,†}, 陈开杰^{1,4}, 王宏伟^{1,2,3,†}, 刘龙祥^{1,3}, 范功涛^{1,2,3},
许杭华^{1,3}, 胡新荣^{1,2}, 李鑫祥^{1,2}, 郝子锐^{1,2}, 杨宇萱^{1,5}, 金晟^{1,2}

(1. 中国科学院上海应用物理研究所, 上海 201800;

2. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. 中国科学院上海高等研究院, 上海 201210;

4. 上海科技大学, 上海 201210;

5. 郑州大学, 郑州 450001)

摘要: 核共振荧光(NRF)实验可对光核反应低激发能级进行研究。上海激光电子伽马源(SLEGS)设计、建造了一组由2台大尺寸同轴高纯锗(HPGe, $\phi 80\text{ mm}\times 70\text{ mm}$)探测器和2台CLOVER HPGe($4\times\phi 50\text{ mm}\times 70\text{ mm}$)探测器组成的核共振荧光光谱仪,大尺寸HPGe探测器获得了大于100%的相对效率和好于0.3%@1332 keV的能量分辨率。谱仪采用Mesytec MDPP-16数字脉冲处理器及MVME获取系统,以读取和记录HPGe前置放大器输出信号的幅度和时间信息。研究了CLOVER HPGe探测器在加和(Add-back)模式和去除(Reduction)模式下的性能提升,结果表明,Add-back重建可以显著提高全能峰效率和峰总比,在1460 keV能量处,Add-back重建后的全能峰效率可以提高21%以上。由于Add-back重建引入了多个晶体之间的耦合,导致探测器能量分辨率有所下降。而Reduction模式可以降低康普顿峰,提高峰总比,并保持和直接(Direct)工作模式同等水平的能量分辨,但是损失了一定的全能峰效率。

关键词: 核共振荧光光谱仪; CLOVER探测器; Add-back模式; Reduction模式

中图分类号: O571.1; TL816⁺.2 **文献标志码:** A **DOI:** 10.11804/NuclPhysRev.40.2022040

0 SLEGS光束线与核共振荧光光谱仪

上海激光电子伽马源(SLEGS)是上海光源(SSRF)二期线站建设的十六条线站之一,主要目标是在上海同步辐射装置(SSRF)上建设一条基于逆康普顿散射效应的专用伽马源光束线站,用于核物理基础和光核反应的应用研究,可以提供0.25~21.7 MeV能量的准单能伽马束^[1]。SLEGS光束线入射激光与电子束的20°~160°变角度碰撞方案设计为国际上首次应用,可以在不改变电子束能量和激光器波长的条件下快速改变出射伽马束的能量,为光核物理研究和伽马束应用提供了新的研究平台。光核反应主要有光弹性散射和非弹性散射($\gamma, \gamma/\gamma'$)、光中子反应(γ, n)、光致带电粒子反应($\gamma, p/\alpha$)及光致裂变反应($\gamma, \text{Fission}$)。($\gamma, \gamma/\gamma'$)反应过程又称为核共振荧光(Nuclear Resonance Fluorescence, NRF),它是粒

子发射阈值以下的核能级吸收实光子,然后退激发到较低束缚能级的过程,如图1(a)所示。NRF测量能够提供有关核结构的重要信息:如激发态能量 E_x ,激发态寿命 Γ ,角动量 J ,自旋宇称 $\pm\pi$ 等。一般来说,原子核中子分离能(S_n)约为8~10 MeV左右,NRF测量的退激伽马射线一般为中子分离能 S_n 以下的共振峰,因此高能量分辨的高纯锗(HPGe)探测器、高探测效率的溴化镧(LaBr₃)探测器及高通量、高极化度光子束是NRF实验研究的有力工具^[2-5]。

光核反应激发函数曲线上最明显特征是在中子分离能以上、伽马能量约10~20 MeV附近的宽共振峰,称为巨偶极共振(GDR),但在中子分离能附近也还存在着一些独立的共振峰,称为矮偶极共振(PDR),研究表明它们是由过剩的中子相对于质子和中子形成核芯的振动形成,因此PDR与原子核的中子皮现象、核物质态方

收稿日期: 2022-03-27; 修改日期: 2022-04-22

基金项目: 国家自然科学基金面上资助项目(11875311, 11905274, 12005280)

作者简介: 匡攀(1995-),女,四川德阳人,在读研究生,从事光核物理实验研究; E-mail: kuangpan@sinap.ac.cn

† 通信作者: 宋龙龙, E-mail: songll@sari.ac.cn; 王宏伟, E-mail: wanghw@sari.ac.cn

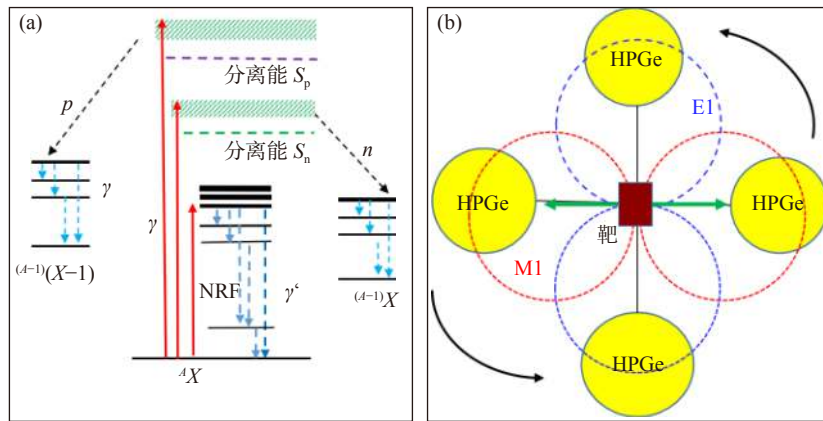


图 1 NRF 的能级伽马跃迁 (a) 及探测布局 (b) 示意图 (在线彩图)

程等物理量密切相关，目前为止有关原子核矮偶极共振的实验测量还不多。目前世界上正在运行的 MeV 准单能逆康普顿散射伽马光源只有美国 HI γ S 装置和上海光源 SLEGS 光束线站，能够开展光核反应 NRF 实验测量的谱仪，也只有 γ^3 谱仪 [2] 和 SLEGS 光束线站的 NRF 谱仪，以及在建的欧洲 ELI-NP 装置的 ELIADDE 谱仪 [6]，因此光核反应的 PDR 实验研究无法有效和全面地开展。新的 γ^3 谱仪由 4 台 $\Phi 76 \text{ mm} \times 76 \text{ mm}$ 、4 台 $\Phi 38 \text{ mm} \times 38 \text{ mm}$ LaBr₃:Ce 探测器和 4 台相对效率为 60% 的同轴 HPGe 探测器组成紧凑球形布局，具有高探测效率、高能量分辨率能力 [2]。ELI-NP 的 ELIADDE (ELI-NP Array of Detectors) 由 8 台带有反康装置的 CLOVER HPGe 和 4 台大尺寸溴化镧 (LaBr₃) 组成。ELI-NP 的伽马源束线分支 (VEGA) 预计到 2023 年建成，ELIADDE 谱仪目前也正在建设中。

SLEGS 是将 $10.64 \mu\text{m}$ CO₂ 激光引入至 SSRF 储存环中，与 3.5 GeV 电子束发生碰撞产生逆康普顿散射伽马射线，能量范围 0.25~21.7 MeV，全谱积分通量约为 $10^5 \sim 10^7$ phs/s，能量分辨可在 2%~15% 范围内选择，在斜入射模式 ($20^\circ \sim 160^\circ$) 下可以实现能量在 0.25~21.1 MeV 之间调节，调节步长在 50 keV 左右，在背散射模式 (180°) 下伽马束的能量达到最大值 21.7 MeV，极化度可以达到 95% 以上。NRF 谱仪通常由 4 台以上的 HPGe 探测器组成，可 $0 \sim 360^\circ$ 转动角度，分别位于极化平面 [图 1(b) 的水平绿色线] 和垂直平面，为了提高高能量伽马射线的探测效率通常会配备一定数量的大尺寸溴化镧 (LaBr₃) 探测器，组成近球型的空间布局。因此 SLEGS 光束线的准单能极化伽马束和 NRF 谱仪可用于核能级的电磁跃迁极性研究，NRF 谱仪的 HPGe 探测器位置转动可识别出磁偶极 M1 与电偶极 E1 共振极性的不同，GDR 和 PDR 均为电偶极激发，是激发强度较高的集体运动模式。

SLEGS 的 NRF 谱仪包括美国堪培拉 (Canberra) 公司生产的 2 台大尺寸同轴型 HPGe ($\Phi 80 \text{ mm} \times 70 \text{ mm}$ ，命名为 S-HPGe) 探测器和 2 台 CLOVER 探测器 [7-11]，CLOVER 由 4 个 N 型同轴 HPGe 探头拼装组成，每个探头未拼装前均为原始直径 50 mm，长度 70 mm 的圆柱状高纯锗晶体。晶体通过适当切割后紧密排列成四叶草 (CLOVER) 形状，如图 2 所示，晶体在其二分之一长度处以 7.1° 的夹角切割后使其前表面呈方形，探头排布更加紧凑，切割拼接后的 CLOVER 探测器总灵敏体积为 470 cm^3 ，占到 4 个原始晶体的 89%。相邻探头的横向间距仅有 0.2 mm，探头周围和相邻探头之间没有任何吸收材料，一定能量的康普顿散射光子在横穿至相邻的探头时不会产生能量损失。晶体整体封装在铝屏蔽真空腔内部，通过电制冷以达到液氮工作温度 (-185°)。4 个同轴型探头外电极接地，偏置电压 (+3 000 V) 通过一路 SHV 连接器施加至每个探头的内部 N+ 电荷收集电极。电荷收集电极通过交流 (AC) 耦合与前置放大器相连，将四路能量和时间信息输出至后续的电子学电路或数据获取系统。通过将 4 个 HPGe 晶体组装成 CLOVER 探测器可以提高总探测效率，同时保证很好的能量分辨和时间响应，探头数量的提升可以减小多普勒展宽，并且对伽马射线极化有很好的探测灵敏度 [7]。

CLOVER 探测器的电荷灵敏前置放大器与晶体共同封装在铝屏蔽腔体内，前放输入级包括反馈电容、反馈电阻以及结型场效应管，均通过同样的电制冷装置冷却，使其工作在较低温度下，以最大限度地降低热噪声；放大级则工作在室温下。每个前置放大器通过 SMB 连接器提供两路相同的信号输出，输出阻抗为 50Ω 。测试 (Test) 输入端则通过额外的 SMB 连接器与放大器输入级相连，以便输入脉冲信号测试。

SLEGS 的 NRF 谱仪支架为 360° 可旋转角度设计，满足图 1 所示的原子核偶极共振的极化特性测量需求，

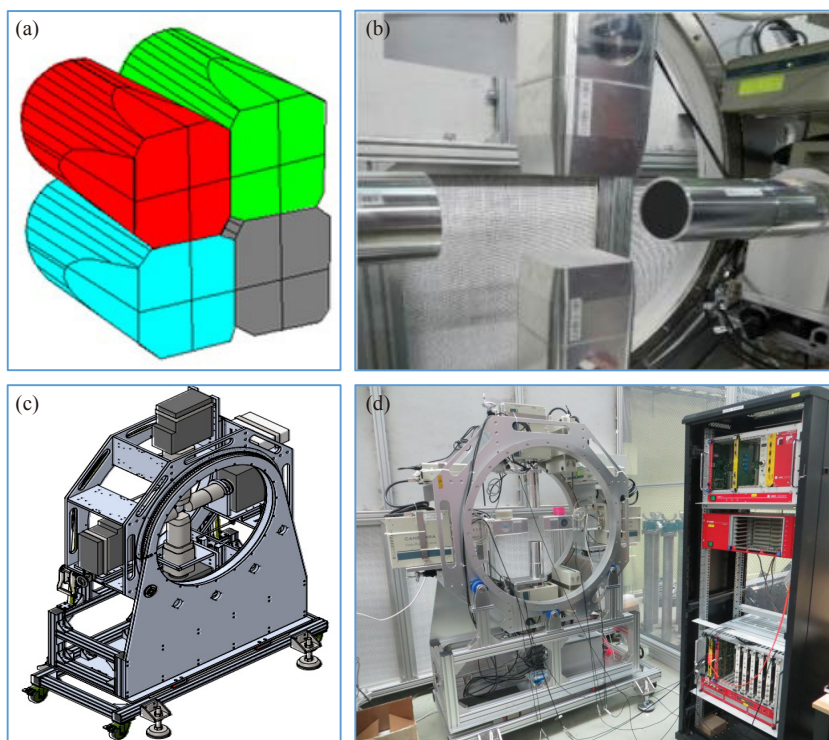


图 2 SLEGS 核共振荧光谱仪(在线彩图)

(a) CLOVER 晶体拼装; (b) 2 台同轴探测器(水平)和 2 台 CLOVER 探测器(竖直); (c) NRF 谱仪工程图; (d) NRF 谱仪及电子学现场照片。

HPGe 探测器固定台架采用可伸缩式设计, 可以手动调节探测器的相对距离, 调节范围为 200 mm, HPGe 探测器均采用电制冷模式, 大大缩小 HPGe 整体尺寸, 以适应上海光源实验站空间狭小的环境条件。

1 Digitizer 波形采样读出与数字化算法

SLEGS 线站 NRF 谱仪采用多通道数字波形采样器(Mesytec MDPP-16 Digital Pulse Processor^[12]或者 CAEN V1725s Digitizer^[13])读出。与传统模拟信号处理系统不同, 数字波形采样器(以 Mesytec MDPP-16 为例)基于 FPGA 固件直接读取光电倍增管(PMT)或者前置放大器输出波形信号, 可以与多种类型的探测器相匹配, 可以方便地调整放大、成形等获取参数, 以进行精确的能量和时间测量, 时间采样设备工作在 16 MHz(62.5 ns)采样频率模式下。图 3 展示了 Mesytec MDPP-16 数字波形采

样读出架构, 电荷灵敏前置放大器的输出脉冲经过一定增益变换和低噪声放大后进行 ADC(80 MHz)采样, 将模拟信号转换成数字信号并送入 FPGA 固件进行信号重建。重建信号通过内置梯形滤波和快时间滤波算法, 得到事例能量信息和时间信息。与传统成形放大器相似, 梯形滤波器将电荷灵敏前置放大器的指数衰减信号转换为脉冲高度与输入脉冲幅度(即能量)成正比的梯形输出。对于脉冲幅度/能量滤波(Pulse amplitude/energy filter), 一般采用较大成形时间(即梯形上升时间)和信号上升时间(即梯形平台保持时间)。这种梯形滤波算法同样存在能量分辨和计数率之间的权衡, 在高计数率场合下, 一般采取较小梯形上升时间以避免信号堆积(Pile-up)。在大尺寸探测器应用中, 梯形平台保持时间选取尽量大, 以避免弹道亏损和电荷收集不完全对能量测量的影响。与整形放大器的高斯脉冲一样, 梯形滤波也需要合适的

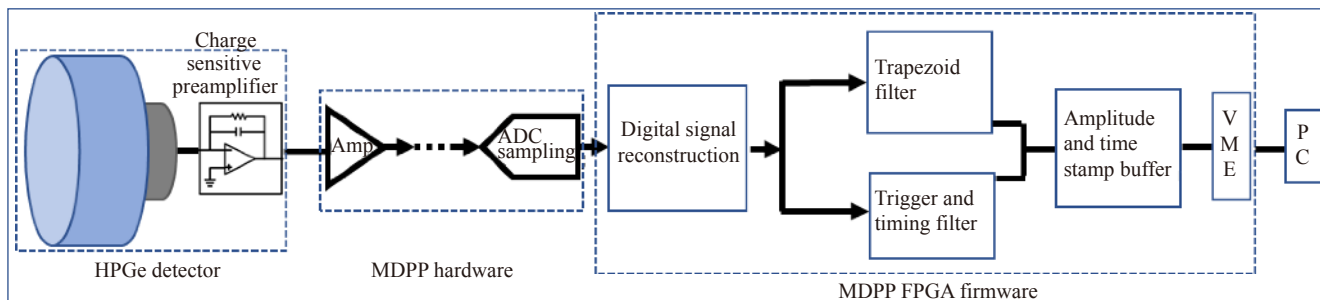


图 3 Mesytec MDPP-16 数字波形采样的读出架构(在线彩图)

极零值以避免信号下冲或过冲效应, 保证信号在下降沿结束时快速回到基线。对于快时间/触发滤波, 滤波器则采用较小的时间参数。此外, 数字恒比定时滤波器 (constant-fraction discrimination, CFD filter) 利用经典的恒比定时算法提取与幅度无关的快时间信息。

2 核共振荧光 (NRF) 谱仪的探测器测试分析

基于 Mesytec 公司的 MVME 数据获取系统, 对 NRF 谱仪探测器的能量分辨和稳定性进行了测试。表 1 展示了各个探头在 662, 1 173 和 1 332 keV 处的能量分辨, 其性能指标优异, 可以满足实验需求。Canberra 公司的电制冷 HPGe 探测器采用了脉冲管制冷方式, 其中 CLOVER 探测器是国内首台采用这种电制冷方式的探头, 制冷器的振动会对探头能量分辨和稳定性产生一定的影响。为了监测 NRF 谱仪探测器长时间工作稳定性, 对其进行 14 h 的连续数据采集, 单组数据采集时间为 10 min, 每组数据采集间隔 10 s, 测试结果如图 4 所示。

在测试时间内 S-HPGe 探测器能量响应的抖动小于 0.04%, CLOVER HPGe 探测器能量响应的抖动小于 0.02%, 可见谱仪探测器系统的能量响应十分稳定。能量分辨随着能量抖动几乎同步变化, 说明其主要受到泊松统计分布的影响, 故而具有相对稳定的能量分辨率。

表 1 核共振荧光 (NRF) 谱仪 HPGe 探测器能量分辨和相对效率 (能量分辨单位为 keV)

| 探测器 | 晶体编号 | 半高全宽 @ 662 keV | 半高全宽 @ 1 173 keV | 半高全宽 @ 1 332 keV | 相对效率/% |
|-----------|------|----------------|------------------|------------------|--------|
| #1 Clover | #C1 | 1.83 | 3.36 | 3.41 | 22.6 |
| | #C2 | 1.69 | 3.03 | 3.02 | 22.1 |
| | #C3 | 1.68 | 2.88 | 2.92 | 22.3 |
| | #C4 | 1.67 | 2.38 | 2.44 | 22.7 |
| #2 Clover | #C1 | 2.55 | 2.10 | 2.18 | 23.3 |
| | #C2 | 2.30 | 1.95 | 2.03 | 22.1 |
| | #C3 | 1.91 | 2.00 | 2.01 | 22.4 |
| | #C4 | 2.06 | 1.98 | 2.00 | 23.1 |
| #1 S-HPGe | | 2.30 | 3.16 | 3.16 | 105 |
| #2 S-HPGe | | 2.67 | 3.13 | 3.11 | 105 |

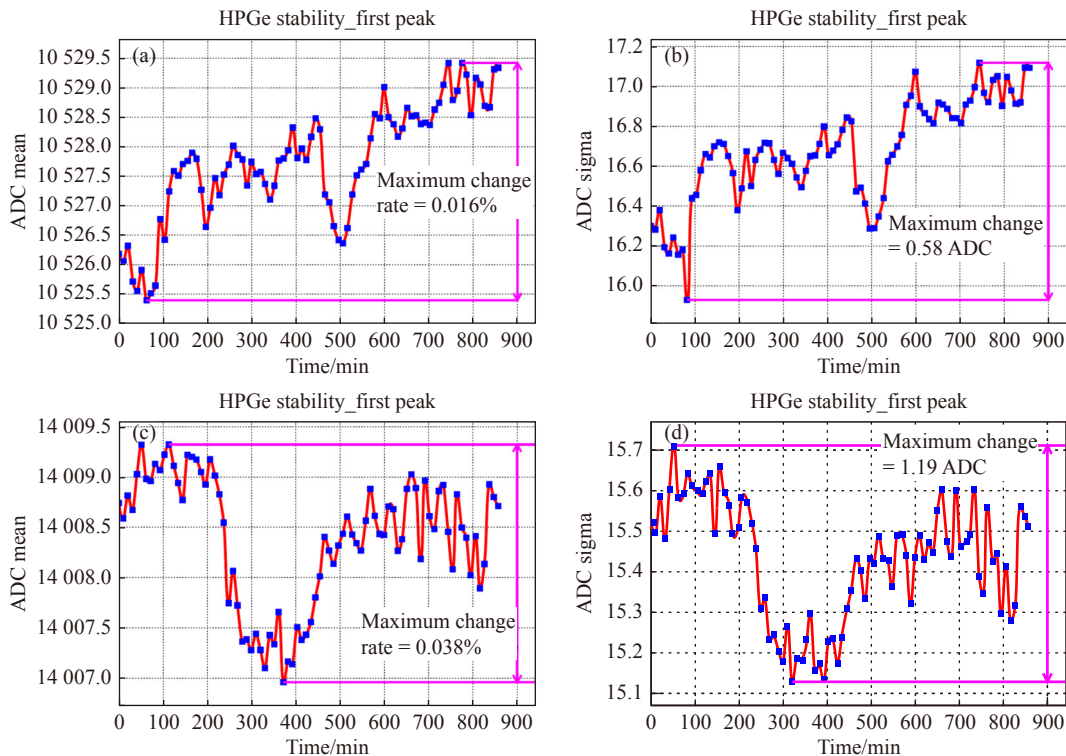


图 4 谱仪探测器稳定性测试结果 (在线彩图)

(a) 和 (b) 分别为 CLOVER 探测器的能量响应和分辨稳定性; (c) 和 (d) 分别为 S-HPGe 探测器的能量响应和分辨稳定性。

伽马射线 (0.2~7.0 MeV) 与锗的主要相互作用过程是康普顿散射 [5]。在 CLOVER 探测器中, 伽马射线可在单个晶体中沉积全部能量, 也可能通过康普顿散射在相邻的晶体中沉积其部分或剩余能量, 或者直接逃离探

测器系统 [3]。这种多重事例的能量沉积在时间上是关联的, 因此可以通过时间符合技术, 将一定时间窗口下多个晶体的能量沉积进行相加 (Add-back), 继而重建出全能峰, 这便是 CLOVER 探测器所特有的 Add-back 工

作模式；反之，利用反符合技术将多个晶体同时测量到的信号去除 (Reduction) 以压制康普顿本底，则为 Reduction 工作模式。相应地，将 CLOVE 的每个晶体都当作一个独立探测器的工作模式即为直接 (Direct) 工作模式。

利用标准刻度放射源 (^{60}Co 、 ^{137}Cs 、 ^{152}Eu) 对 1#CLOVER 探测器的 Add-back 特性进行了研究，标准源的能量范围为 210~1 410 keV。数据采集过程中 ^{60}Co 、 ^{57}Co 和 ^{137}Cs 刻度源与探头入射窗正对，距离约 5 cm， ^{152}Eu 由于活度较高，因此与入射窗距离约 15 cm，以防止探测器接收到的事例率过高而产生脉冲堆积。实验采用了 Mesytec MDPP-16 脉冲采样器和 MVME 数据获取系统，4 个晶体中每个事例的能量沉积和时间信息分别通过对应通道的梯形滤波和时间滤波后，由 ADC 和 TDC 记录下来。标准源测试表明，HPGe 探测器的相对效率好于 100%，能量分辨好于 0.3% @ 1 332 keV。图 5 展示了 CLOVER 探测器在 Direct 模式和 Add-back 模式下对以上四种放射源的能谱响应，以及重建之后的 4 种

事例类型 (一重事例、二重事例、三重事例和四重事例，伽马光子在 N 个晶体内沉积能量，则为 N 重事例)。Add-back 重建的时间窗设置为 62.5 ns，此时间窗口下的事例 (事例数 \leq 晶体数) 被认为是由同一个伽马光子产生。相比于 4 个探头独立工作的 Direct 模式，Add-back 模式将原本属于康普顿坪的信号还原成一个全能峰，因此可以降低康普顿坪高度，尤其是在较低能量处下降更多；而全能峰计数会明显增加，例如在 1 173 和 1 332 keV 处，Add-back 重建后的全能峰计数明显增大 (图 5 中插图所示)。图 6 对比了 Reduction 模式和 Direct 模式下的能谱，以及相邻探头的康普顿散射光子贡献的事例 (即 Add-back 事例)，可见 Reduction 模式下康普顿平台显著降低。

图 7(a) 展示了 Add-back 模式下四种事例类型的占比，此工作模式下全能峰效率的提升主要是由二重事例贡献，二重事例占比随能量的提高而显著增大，在 1 460 keV 处超过了 15%。因此可见，随着测量伽马能

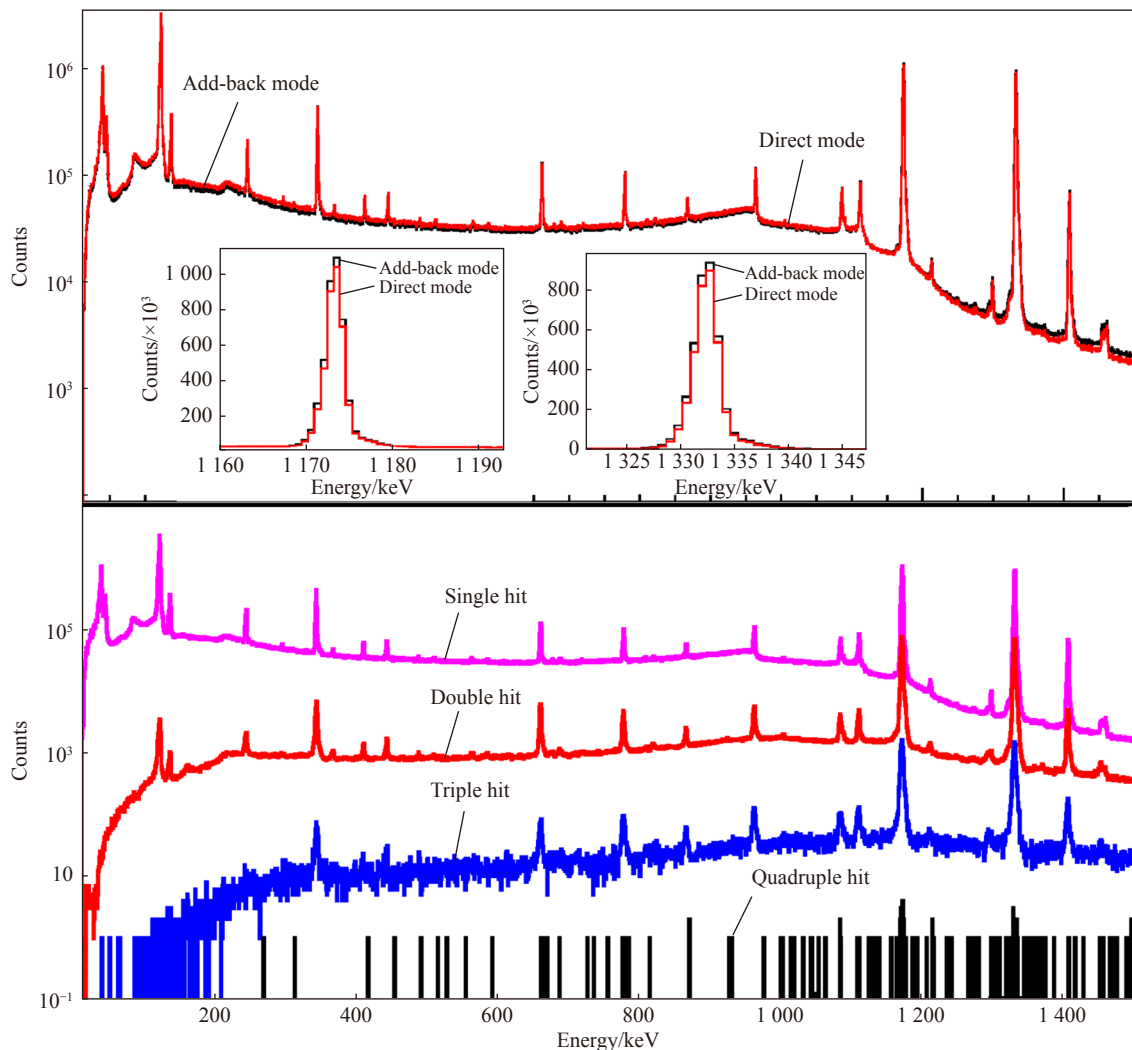


图 5 CLOVER 探测器 Direct 模式和 Add-back 模式 (重建后) 下的能谱 (a) 及 Add-back 模式下的四种事例类型 (b) (在线彩图)

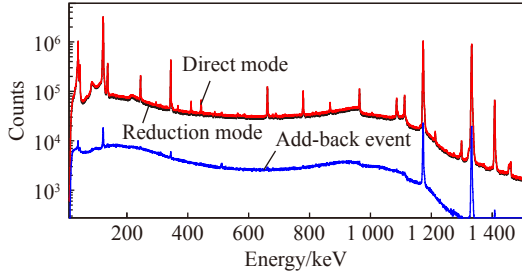


图 6 CLOVER 探测器 Direct 模式和 Reduction 模式下的能谱, 以及被符合算法筛选并重建的 Add-back 事例 (在线彩图)

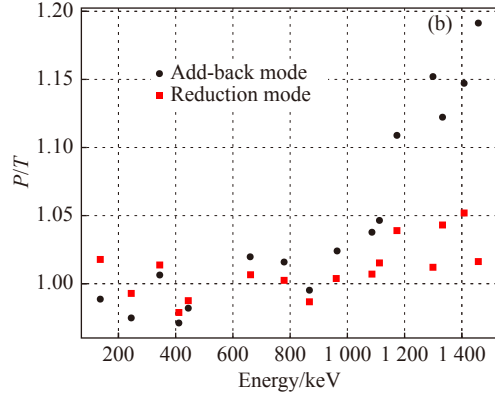
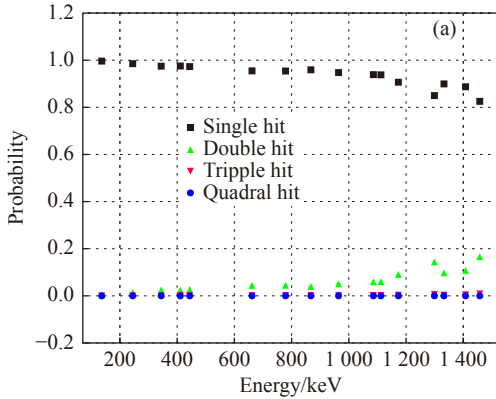


图 7 Add-back 模式下四种事例类型的占比 (或发生概率)(a) 及 Add-back 模式和 Reduction 模式下的峰总比相对于 Direct 模式的变化 (b) (在线彩图)

引入与入射伽马光子能量相关的 Add-back 因子 F , 可以定量描述 CLOVER 探测器在 Add-back 模式下全能峰效率的提升^[7],

$$\epsilon_{\text{tot}} = \sum_i \epsilon_i + f \times \sum_i \epsilon_i = (1+f) \times \sum_i \epsilon_i = F \times \sum_i \epsilon_i, \quad (1)$$

其中 $\sum_i \epsilon_i$ 为 Direct 模式下的效率; $f \times \sum_i \epsilon_i$ 为 CLOVER 探测器 Add-back 重建后得到的二重事例、三重事例和四重事例之和; f 为附加因子。实验测得的 Add-back 因子 F 与伽马能量 (210~1 460 keV) 的关系如图 8 所示, 拟合采用了三次函数。在 1 460 keV 处, Add-back 因子 F 约

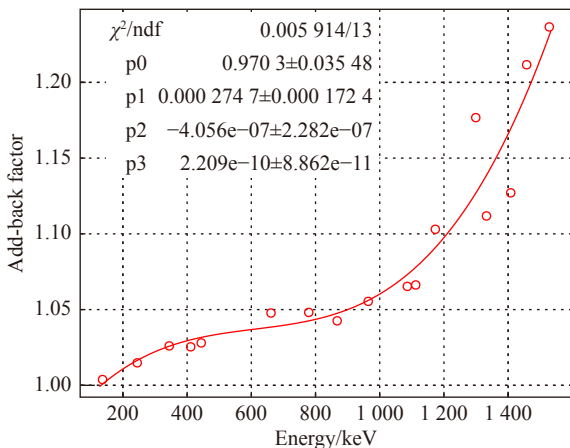


图 8 Add-back 因子 F 随伽马能量的变化 (在线彩图)

量的增加, 单个晶体不能完全沉积伽马能量, 相邻晶体测量到剩余能量的几率显著增加, 这就是高能伽马射线全能峰探测效率逐渐降低的原因。图 7(b) 黑色实心点为 Add-back 模式和 Direct 模式峰总比的比值, 从其变化趋势亦可看出 Add-back 对全能峰的贡献随着能量的增加而增大。Reduction 模式和 Direct 模式峰总比的比值 [图 7(b) 红色方块] 同样随着能量的上升呈现逐渐上升趋势, 这是由于 Reduction 模式虽然没有贡献全能峰计数, 但是压制了康普顿本底计数。

为 1.22, 说明此处多重事例贡献了约 22% 的全能峰效率, 与峰总比的比值 21% 接近。

对于工作在 Direct 模式和 Reduction 模式下的 CLOVER 探测器, 能量分辨在忽略载流子俘获和弹道亏损的情况下可表示为^[7]

$$\delta^2 E = N^2 + \alpha_1 E_\gamma, \quad (2)$$

其中 N^2 为探头晶体和前放电子学的贡献, 与伽马能量无关; $\alpha_1 E_\gamma$ 为电荷收集项, 上式将四个晶体当作了完全相同的独立工作模块, 忽略了其间的串扰。在 Add-back 工作模式下, 康普顿散射光子会穿过 n 个晶体 ($1 \leq n \leq 4$), 相应的能量分辨 ($\delta E = \text{FWHM}$) 为

$$\delta^2 E = \sum_{n=1}^4 P_n (nN^2 + \alpha_n E_\gamma), \quad (3)$$

其中 P_n 为四种类型事例的占比见图 7(a), α_n 用于描述 n 重事例下的电荷收集。从实验测试结果 [图 5、图 7(a)] 可以看出, 在 ~1.5 MeV 伽马能量以下, 三重事例和四重事例的占比可以忽略 (在更高能区, 康普顿散射光子的能量足够高, 将使得三重/四重事件不可忽略), 故式 (3) 可以写为

$$\delta^2 E = \frac{1}{F} (N^2 + \alpha_1 E_\gamma) + \frac{F-1}{F} (2N^2 + \alpha_2 E_\gamma), \quad (4)$$

式中：系数 $1/F$ 和 $(F-1)/F$ 分别为一重事例和二重事例的概率； F 为 Add-back 因子。

图 9 即为标准刻度源对应的能量下，对 Direct 模式（一重事例）以及 Add-back 模式下二重事例的线性拟合结果，拟合得到的 nN^2 和 α_n 值见表 2。由于拟合误差较大，使得二重事例下的 nN^2 略大于一重事例的两倍。将图 8 中的三次拟合函数和表 2 中的数据代入式 (4) 中，即可估算出 Add-back 模式下的能量展宽，能量分辨计算曲线如图 9 中蓝线所示，尤其是在高能区与重建后 Add-back 模式下的能量分辨符合得很好。低能区拟合得到的能量分辨远大于理论计算所得，并且此能区 Direct 模式和 Reduction 模式下的能量分辨符合得很好，可见这是由于 Add-back 在低能端引入了一定偶然符合。

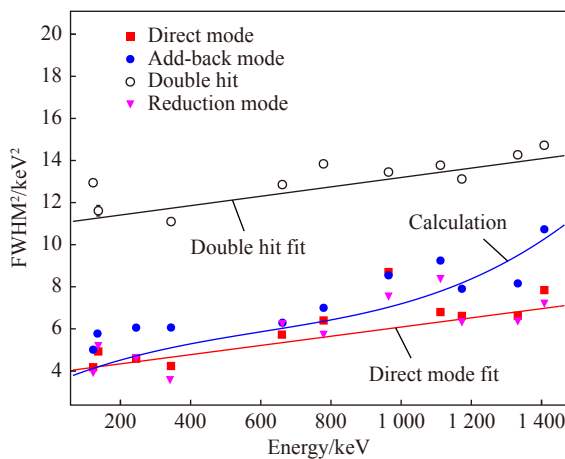


图 9 Add-back 模式、Reduction 模式和 Direct 模式下的能量分辨(在线彩图)

表 2 拟合得到的 nN^2 和 α_n 的值

| | $n = 1$ | $n = 2$ |
|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| nN^2/keV^2 | 3.90 | 10.96 |
| α_n/keV | 2.19×10^{-3} | 2.23×10^{-3} |

在能谱测量中，伽马光子的(全能峰)探测效率会随着其能量升高而下降，高能伽马康普顿坪会淹没强度较弱的低能伽马射线全能峰，这会严重影响低能量伽马射线的测量和识别，如核共振荧光信号和核素特征伽马射线，Add-back 模式可以降低康普顿坪，提高全能峰计数，可以起到和反康探头类似的效果。在 CLOVER 探测器中，随着所探测的伽马光子能量升高，非全能量沉积事件(二重事例、三重事例和四重事例)比例增大，Add-back 重建带来的全能峰效率提升也增大，代价是损失了一定的能量分辨(但其能量分辨仍能保持在 $0.3\% @ 662 \text{ keV}$ 以内)，并且效率提升越大，能量分辨损失也越大。Reduction 模式虽然全能峰效率不及 Add-back 模式，但其拥有和 Direct 模式同等水平的能量分辨(图 9)，同时压低了康普顿坪，使得峰总比有所提升。

3 总结与展望

SLEGS 光束线站配备了由 4 台 HPGe 探测器组成基本构型的 NRF 谱仪，分别为 2 台同轴型 HPGe 探测器和 2 台 CLOVER HPGe 探测器，由于空间紧凑性限制，没有加装反康探头，大尺寸同轴型 HPGe 和 CLOVER 的设计，有效提高了伽马射线总探测效率，同时保证很好的能量分辨和时间响应，颗粒度的提升可以减小多普勒展宽，并且对伽马射线极化有很好的灵敏度， 360° 可旋转及位置调节台架的设计满足 NRF 实验的极化测量需求，HPGe 晶体电制冷方式减轻了频繁灌装液氮问题及增加设备布局的紧凑性。SLEGS 的 NRF 谱仪采用数字波形采样(Digitizer)读出系统，其系统集成度高、电路结构简单、可实现多参数测量和事件的时间标记，脉冲数字波形采样读出系统直接读取前放脉冲波形，并通过内部固件转换为数字信号并标记时间戳，相较于传统的模拟电子学来说，时间戳使得 CLOVER 等多探头的符合分析更加便捷，在一定的时间窗内可以将多晶体沉积事件累加(或去除)，即 Add-back 工作模式(或 Reduction 工作模式)，可以提高高能伽马光子的全能峰探测效率，降低康普顿坪计数。

利用 ^{60}Co 、 ^{137}Cs 和 ^{152}Eu 等标准放射源，对 CLOVER 探测器的 Add-back 模式和 Reduction 模式进行了研究，结果表明，Add-back 重建可以显著提高全能峰效率和峰总比，尤其是在高能处增加显著。例如，在 1460 keV 处 Add-back 模式下的全能峰效率可以提高约 21% 以上，由于 Add-back 重建引入了多个晶体之间的耦合，导致能量分辨率稍有下降，因此 CLOVER 探测器在 Add-back 模式下全能峰效率的提升是以损失较小的能量分辨率为代价的。而 Reduction 模式可以降低康普顿坪，提高峰总比，并保持和 Direct 工作模式同等水平的能量分辨，代价是损失了一定的全能峰效率。SLEGS 伽马源具有准单能特性，目前正在建设伽马探测器刻度平台，未来将会继续研究 CLOVER 探测器在 2 MeV 能量以上的 Add-back 和 Reduction 特性。

参考文献:

- [1] WANG Hongwei, Fan Gongtao, LIU Longxiang, et al. *Nuclear Physics Review*, 2020, 37(01): 53. (in Chinese)
(王宏伟, 范功涛, 刘龙祥, 等. *原子核物理评论*, 2020, 37(01): 53.)
- [2] LÖHER B, DERYA V, AUMANN T, et al. *Nucl Instr and Meth A*, 2013, 723: 136.
- [3] HAO Z R, FAN G T, WANG H W, et al. *Nucl Instr and Meth A*, 2021, 1013: 165638.
- [4] HAO Zirui, FAN Gongtao, LIU Longxiang, et al. *Nuclear Techniques*, 2020, 43(11): 61. (in Chinese)

- (郝子锐, 范功涛, 刘龙祥, 等. *核技术*, 2020, 43(11): 61.)
- [5] WANG Junwen, FAN Gongtao, LIU Longxiang et al. *Nuclear Techniques*, 2019, 42(12): 20. (in Chinese)
(王俊文, 范功涛, 刘龙祥, 等. *核技术*, 2019, 42(12): 20.)
- [6] VLASE S, BORZA P N, SULIMAN G, et al. *Acoustics and Vibration of Mechanical Structures (avms-2017)*, 2018, 198: 263.
- [7] DUCHENE G, BECK F A, TWIN P J, et al. *Nucl Instr and Meth A*, 1999, 432(1): 90.
- [8] WANG H L, SONG L T, ZHAO W J, et al. *Chinese Phys C*, 2010, 34(3): 379.
- [9] EBERTH J, SIMPSON J. *Progress in Particle and Nuclear Physics*, 2008, 60(2): 283.
- [10] ZHANG N T, LEI X G, GUO Y X, et al. *Journal of Physics G:Nuclear and Particle Physics*, 2013, 40(3): 035101.
- [11] ZHANG Ningtao, LEI Xiangguo, ZHANG Yuhu, et al. *Chinese Physics Letters*, 2012, 29(4): 042901.
- [12] Mesytec MDPP-16 [EB/OL]. [2022-03-19]. <http://www.mesytec.com/products/nuclear-physics/MDPP-16.html>.
- [13] CAEN V1725 Digitizer [EB/OL]. [2022-03-19]. <https://www.caen.it/products/v1725/>.

Nuclear Resonance Fluorescence Spectrometer Design and Detector Performance Analysis of Shanghai Laser Electron Gamma Source(SLEGS)

KUANG Pan^{1,2}, SONG Longlong^{3,†}, CHEN Kaijie^{1,4}, WANG Hongwei^{1,2,3,†}, LIU Longxiang^{1,3}, FAN Gongtao^{1,2,3}, XU Hanghua^{1,3}, HU Xinrong^{1,2}, LI Xinxiang^{1,2}, HAO Zirui^{1,2}, YANG Yuxuan^{1,5}, JIN Sheng^{1,2}

(1. Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. Shanghai Advanced Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201210, China;

4. ShanghaiTech University, Shanghai 200120, China;

5. Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: Nuclear resonance fluorescence(NRF) experiments can be used to study the low excitation energy levels of photo-nuclear reactions. Shanghai Laser Electron Gamma Source(SLEGS) designed and constructed a NRF spectrometer consisting of two large-scale coaxial high-purity germanium(HPGe, $\phi 80\text{ mm}\times 70\text{ mm}$) detectors and two CLOVER HPGe($4\times\phi 50\text{ mm}\times 70\text{ mm}$), the large-scale HPGe detectors obtained relative efficiency greater than 100% and energy resolution better than 0.3% @ 1 332 keV. The spectrometer adopts Mesytec MDPP-16 digital pulse processor and MVME acquisition system, which can read and record the amplitude and time information of the HPGe preamplifier output signal. The Add-back mode and Reduction mode of the CLOVER HPGe detector are studied. Results show that Add-back reconstruction can significantly improve the full-energy peak efficiency and peak-to-total ratio, the full-energy peak efficiency after Add-back reconstruction can be improved by more than 21% at 1 460 keV energy. The detector energy resolution is slightly degraded due to the coupling between multiple crystals introduced by the Add-back reconstruction. Whereas at reduction mode, it can reduce the compton peak, improve the peak-to-total ratio, and maintain the energy resolution as good as the Direct mode, however, a certain amount of full energy peak efficiency is lost.

Key words: nuclear resonance fluorescence(NRF) spectrometer; CLOVER detector; add-back mode; reduction mode

Received date: 27 Mar. 2022; Revised date: 22 Apr. 2022

Foundation item: National Natural Science Foundation of China(11875311, 11905274, 12005280)

† Corresponding author: SONG Longlong, E-mail: songll@sari.ac.cn; WANG Hongwei, E-mail: wanghw@sari.ac.cn