

ZnO:Ga 晶体对质子的响应

马彦良¹, 欧阳晓平¹, 张忠兵¹,

王 兰¹, 刘林月¹, 潘洪波¹, 陈 亮¹, 张景文²

(1. 西北核技术研究所, 陕西 西安 710024; 2. 西安交通大学, 陕西 西安 710049)

摘要:对 ZnO:Ga 晶体进行质子辐照实验研究, 得到对脉冲质子的响应波形和发光强度随质子能量的变化关系, 并对实验现象和结果进行了分析。结果表明, 该晶体对质子束具有很好的响应特性, 与快速光电探测器相结合, 可作为反冲质子探测元件, 用于脉冲中子探测。

关键词: ZnO:Ga; 无机晶体; 质子辐照; 响应波形

中图分类号: TL816; O739

文献标志码: A

文章编号: 1000-6931(2009)09-0848-03

Response of ZnO:Ga Crystal to Proton Beam

MA Yan-liang¹, OUYANG Xiao-ping¹, ZHANG Zhong-bing¹,

WANG Lan¹, LIU Lin-yue¹, PAN Hong-bo¹, CHEN Liang¹, ZHANG Jing-wen²

(1. Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China;

2. Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: The experiment of ZnO:Ga crystal to pulsed proton was performed. The time response to protons and relationship between the luminescence intensity of crystal and the proton energy were obtained. The phenomena and results were analysed. The results show that the crystal has a good response to proton beam, and can be used to detect pulsed neutrons in recoil proton system with fast photodevice.

Key words: ZnO:Ga; inorganic crystal; proton radiation; response curve

中子不带电荷, 不能直接引起物质电离而被探测, 探测中子必须借助其与原子核发生相互作用而产生的次级带电粒子。通常, 用于中子探测的方法有: 核反应法、核反冲法、核裂变法与核激活法。反应产物包括裂变碎片、 α 粒子、氦核、氘核和质子等带电粒子。反冲质子法通常使用的是 PIN 探测器^[1], 而 ZnO:Ga 晶体较 PIN 探测器突出的优点是时间响应快, 对散

射中子的响应小, 且可通过光电倍增管便捷地调节探测系统的中子灵敏度。ZnO:Ga 晶体能否接收反冲质子用于脉冲中子探测以及大剂量长时间的重粒子辐照是否会带来辐射损伤, 是需要研究的课题。ZnO:Ga 薄膜通过磁控溅射生长, 厚度为 300 μm , 发光中心波长为 385 nm。光电倍增管选用的是 EMI 9815。利用 4 ~ 26 MeV 的脉冲和直流质子束进行实验, 记录

ZnO:Ga 晶体对脉冲质子的响应波形, 以及 ZnO:Ga 晶体的发光强度随质子能量的变化曲线, 并对实验结果和实验现象进行分析。

1 测量系统

HI-13 串列加速器能提供 H^+ 、 He^{2+} 、 S^{2-} 、 O^{2-} 等多种离子。本工作利用 HI-13 提供的高速 H^+ 直接轰击 ZnO:Ga 晶体, 获得 ZnO:Ga 晶体和光电倍增管组成的探测系统对质子脉冲的响应波形。实验系统如图 1 所示。

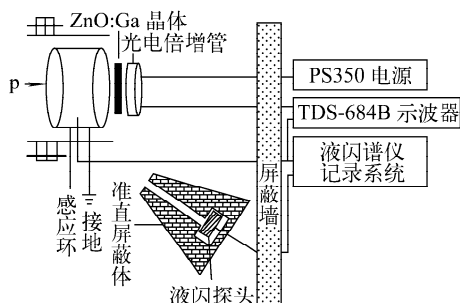


图 1 ZnO:Ga 晶体对脉冲质子响应实验系统

Fig.1 Schematic diagram for response of ZnO:Ga crystal to pulsed proton

测量系统由波形测量系统和质子源强监测系统组成, 波形测量系统由 ZnO:Ga 晶体、光电倍增管、信号电缆和示波器组成。长约 40 m 的 SYV-50-17 电缆连接光电倍增管与示波器, 用电缆把光电倍增管的高压输入端与置于测量间的高压电源相连。质子源强监测系统利用加速器管道中的质子脉冲产生的 (p, γ) 反应原理, 通过液闪 γ 时间谱仪测量的 γ 信号来测量质子源强信号, 管道中的感应环的感生电流为 γ 时间谱仪和示波器分别提供门信号和触发信号。为获得 ZnO:Ga 晶体与质子能量的变化关系, 把探测系统放置到直流质子束测量通道, 由小电流计测量光电倍增管的输出信号电流, 计算机通过 GPIB 接口控制小电流计, 以固定的时间间隔读取数据, 取平均电流值作实验值。

2 实验数据及分析

实验采用 1 024 道谱仪记录 γ 时间谱, γ 谱峰值均在 540~560 道之间, 由于 γ 谱形基本是高斯形, 故数据处理时采用高斯拟合。图 2 所

示为液闪时间多道谱仪的监测数据。ZnO:Ga 晶体和光电倍增管构成的探测系统对 7 MeV 脉冲质子的响应波形如图 3 所示。

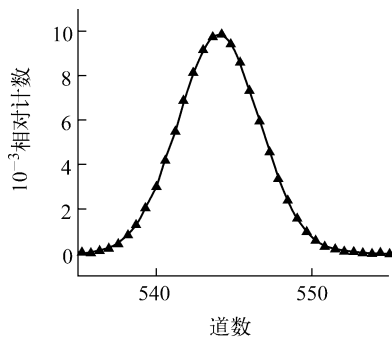


图 2 $E_p = 7$ MeV 时多道记录谱形

Fig.2 MCA time spectrum at $E_p = 7$ MeV

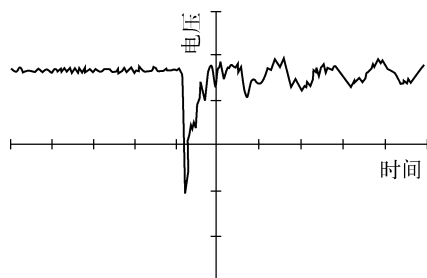


图 3 ZnO:Ga 晶体 + 光电倍增管对脉冲质子的响应

Fig.3 Response of ZnO:Ga+PMT to pulsed proton
横坐标: 1 格代表 100 ns; 纵坐标: 1 格代表 250 mV

由图 3 所示的负脉冲波形可看到有散射干扰, 其来源可能是质子穿透 ZnO:Ga 晶体后, 与放置探测器的密封容器通过 (p, γ) 反应产生 γ 射线, γ 射线与 ZnO:Ga 晶体作用生成的闪烁光脉冲; 也可能是晶体的发光通过密封容器内壁多次反射后的叠加。后沿的振荡产生于电子学匹配问题。若切断感应环的触发信号, 由示波器自触发, 可观测到信号脉冲具有周期性, 且信号脉冲的周期与质子源倍频的改变保持一致。

图 4 所示为 ZnO:Ga 晶体和光电倍增管构成的探测系统随质子能量的变化曲线(对实验数据进行光滑处理)。实验所用 ZnO:Ga 晶体厚度为 300 μm , 可全部沉积能量约为 8 MeV 的质子。随着能量的增加, 质子在 ZnO:Ga 晶体中的射程增加, 在晶体中沉积能量的增幅会越来越小。ZnO:Ga 晶体的发光强度随质子能量增加而增加, 当质子能量大于 8 MeV 后, 增加

幅度逐渐趋于平缓(图4)。

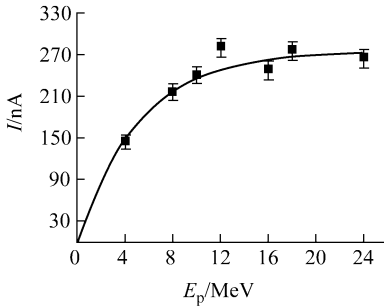


图4 ZnO:Ga晶体对质子能量响应曲线

Fig. 4 Energy response of ZnO:Ga crystal to protons

为提高测量精度,保证束流在晶体上的有效作用面,并保持一定的束流强度,每次换能量均需通过荧光靶对质子束流重新对焦。本工作中发现,质子辐照后,由于 (p, γ) 反应使得ZnO:Ga晶体被活化,剂量仪显示最大的剂量当量率达到 $20 \mu\text{Sv/h}$ 。我们曾研究过ZnO:Ga晶体对 γ 射线的响应,发现其发光强度明显好于闪烁体,与常见的ST401塑料闪烁体处于同一数量级^[2],但ZnO:Ga晶体对质子的响应幅度却低很多,发光强度也明显弱些。48 h的大剂量质子连续辐照后,ZnO:Ga晶体对12 MeV脉冲质子的时间响应波形积分量是辐照前的90%。辐射损伤特性与束流调节的不确定性构成了实验误差的主要来源。

文献[3]对无机晶体的这种发光特性减弱现象进行了定性分析。 γ 射线和激光在ZnO:Ga晶体中是全贯穿的辐射效应,质子等重带电粒子在晶体中的射程比光子小得多。重带电粒子电荷收集过程的能量通常较高,在很短射程内形成了高电离密度,存在等离子体效应。带电粒子径迹区内形成浓密度等离子体破坏了晶格结构,高能质子辐照在晶格中形成温度达上千开尔文的测温锥,发光中心遭到了破坏,在这些区域形成了线缺陷、体缺陷或簇缺陷,构成了一系列猝灭中心^[4],从而降低了光输

出。同时也能引起中心波长峰位变化,以及吸收光谱和透射光谱变化^[5-6]。

3 结论

用ZnO:Ga晶体成功探测到了脉冲质子信号,且脉冲波形很好地反映脉冲质子源强特性。这意味着,ZnO:Ga晶体与快速光电探测器相结合,可作为反冲质子探测元件用于脉冲高能中子探测系统中。大剂量长时间的重粒子辐照会带来晶体的辐射损伤,引起晶体结构和光学性质变化,尤其是发光强度的减弱。今后还应开展相关的实验和理论研究。

中国原子能科学研究院核物理研究所HI-13串列加速器运行组提供了稳定束流,中子组完成了伽玛时间谱的监测,夏海鸿、周祖英、刘建成等给予了极大的帮助,在此表示感谢。

参考文献:

- [1] 汲长松. 中子探测实验方法[M]. 北京:原子能出版社,1998:63.
- [2] 汲长松. 核辐射探测器及其实验技术手册[M]. 北京:原子能出版社,1990:316.
- [3] RYZHIKOV V D, STARZHINSKIY N G. Behavior of new ZnSe (Te, O) semiconductor scintillators under high doses of ionizing radiation [J]. IEEE Trans Nucl Sci, 2001, 48(4): 1 561.
- [4] GRAVEL L A, NOVIKOV YU B, PLECHKO R L. Infrared absorption of zinc selenide crystals [J]. Zh Prikl Spekr, 1999, 30(4): 707-711.
- [5] ATROSCHENKO L V, BURACHAS S F, GALCHINETSII L P, et al. Crystals of scintillators and detectors on their base [M]. Kiev, Ukraine: Naukova Dumka, 1998.
- [6] RYZHIKOV V D, STARZHINSKIY N G, SILIN V I. A new ZnSe (Te) scintillator: Luminescence mechanism [J]. Nuclear Tracks Radiation Measurement, 1993, 2(1): 53-55.