

6×6 BGO 晶体阵列电磁量能器的 研制及低能光子测量¹⁾

朱国义 何景棠 郁凌 苗挺 顾以藩 钱忠敏

(中国科学院高能物理研究所,北京)

摘 要

研制了6×6锗酸铋晶体阵列式探测器,作为高分辨全吸收电磁量能器模型。晶体阵列由36块截面为20mm×20mm、长度为200mm的国产锗酸铋晶体组成,采用光电倍增管读出,从阳极及一个打拿极同时输出讯号,以满足大动态范围线性要求。在静电加速器上应用若干(p, γ)反应产生的单能光子进行了测试。结果表明:在所测21MeV以下范围内,能量响应线性;能量分辨率表现为予期的 $E^{-\frac{1}{2}}$ 关系,与国际上现有同类装置比较具有最佳能量分辨性能。

一、引 言

锗酸铋晶体(Bi₄Ge₃O₁₂,简称BGO)具有辐射长度短;莫里哀半径小;化学性能稳定和不潮解等特点,被公认为一种优秀的电磁量能器材料。针对高能物理实验的需要,我们最先对国产BGO晶体开展了系统研究。在单块小尺寸^[1]和单块大尺寸^[2]BGO晶体以及3×3BGO晶体阵列^[3]性能研究的基础上,研制了6×6晶体阵列,作为高分辨全吸收电磁量能器模型。BGO晶体阵列的研制,不仅为在北京正负电子对撞机上设计建造大型高分辨全吸收电磁量能器提供实际经验,同时,也可以作为一个独立的探测装置用于开展小型物理实验研究^[4,5]。本文报导BGO晶体阵列的研制以及利用低能(p, γ)反应光子进行的测量。

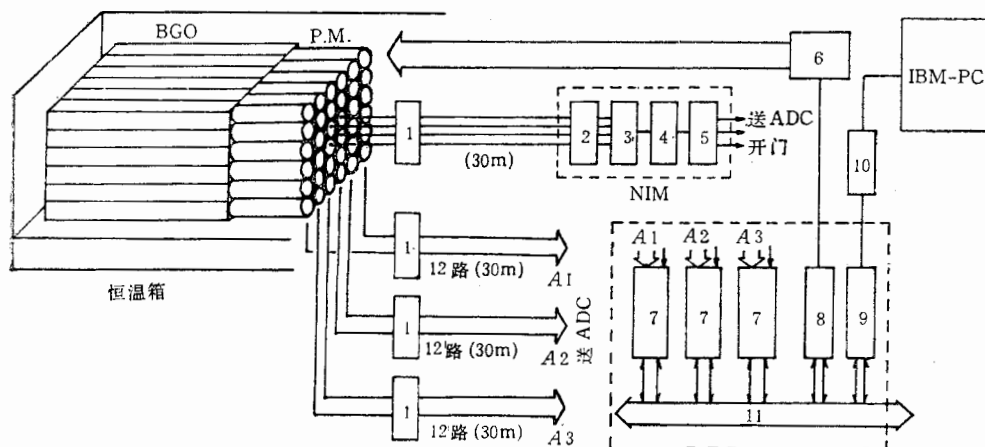
二、晶体阵列研制

6×6 BGO 晶体阵列电磁量能器由以下主要部份组成: 1)晶体阵列; 2)光电倍增管读出系统; 3)电子学及在线数据获取系统; 4)温控装置。图1是整个装置的示意图。

1. 晶体阵列

6×6阵列由上海硅酸盐研究所生长的晶体堆垛而成。每块晶体加工成20×20×200mm³的长方体,六面抛光,五面(除与光电倍增管耦合的一面外)用白纸包装,外裹镀

1) 本工作部分地获得科学院基金支持。
本文1989年5月6日收到。

图 1 6×6 BGO 晶体阵列装置示意图

1. 前端电路 2. 甄别器 3. 或门 4. 双定时器 5. 扇出 6. 高压电源 7. ADC 8. C-139
9. CC-6002 10. PC-004 11. CAMAC DATAWAY

铝涤纶薄膜。对晶体的主要性能进行了逐块测试。结果表明: 36 块晶体的纵向光输出均匀性好于 $\pm 1\%$, 射线从顶端入射时, 对于 ^{137}Cs 的 0.662MeV γ 射线的能量分辨率 (FWHM) 约在 23—26% 之间, 光输出平均为 NaI(Tl) ($\phi 30 \times 25\text{mm}$) 的 5%^[6]。

试验了在晶体表面涂刷反射漆以进一步改善光输出的方案。在比较不同涂漆方式的基础上, 找到一种简易可行的方案是在与光电倍增管耦合面相对的一面涂以厚约 $200\mu\text{m}$ 的 NE 500 白漆。在 36 块晶体上采用这种方案, 收光效率约可增加 20%, 相应改善能量分辨率 15%, 同时保持了原有的纵向光输出均匀性。

2. 光电倍增管读出系统

采用外径 19.5mm 的日本 Hamamatsu R 1213 型光电倍增管作为晶体的读出元件。光电倍增管读出的优点是信号噪声比好, 且本身具备放大作用。为了保证阵列测量所需的大线性能量范围 ($0.5\text{MeV}—5\text{GeV}$), 采用了光电倍增管阳极与第七打拿极同时输出的方案: 由阳极输出提供低能段 ($0.5—50\text{MeV}$) 的线性讯号; 第七个打拿极提供高能段 ($\leq 50\text{MeV}—5\text{GeV}$) 的线性讯号, 每段的动态范围约为 100。建立了模拟 $0.5\text{MeV}—50\text{GeV}$ 光子能量范围, 由发光二极管阵列组成的脉冲光源, 用于调试光电倍增管。每个光电倍增管在其分压线路进行仔细调试后, 同时从阳极和打拿极输出讯号, 能够在 $\sim 1\text{MeV}—3\text{GeV}$ 范围内满足线性要求 ($\pm 1\%$), 并保持良好的能量分辨性能。典型的光电倍增管分压线路如图 2 所示。高压由 CAEN SY127 电源供给, 通过接口 (C-139) 与 CAMAC 系统连接。

3. 电子学及在线数据获取系统

光电倍增管讯号经自制的前端电子学线路进行阻抗匹配后, 通过 30m 阻抗为 50Ω 的同轴电缆传输到脉冲幅度数字转换器 Lecroy ADC 2249W。前端电子学采用晶体管印刷线路制作的双管怀特跟随器, 做成插件形式。线路布置注意了结构紧凑和尽量避免各路之间的相互干扰。另外, 从光电倍增管的第十个打拿极引出信号, 经放大、延时 (50ns)、

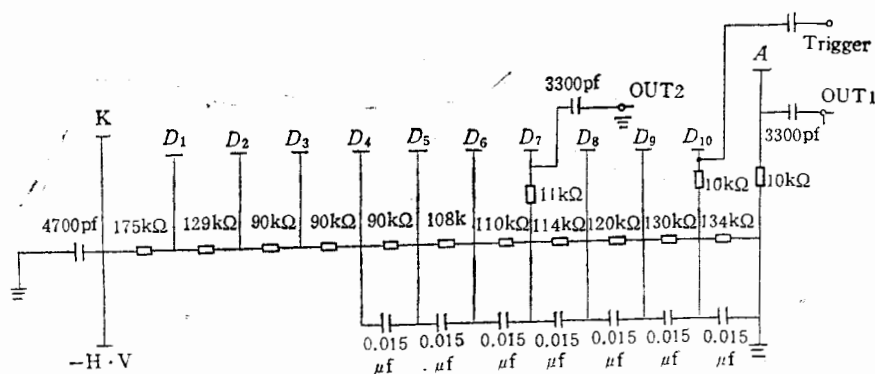


图2 光电倍增管高压分压线路

整形、“或”门和双定时线路后,给出一个宽度可以调节的信号,作为触发开门之用。其中的放大触发线路也是自制的。

从 ADC 输出的数字化信号由 CAMAC 数据总线送入 6002 机箱控制器并通过接口卡联结微型计算机 IBM-PC,进行在线数据获取。获得的数据存入软盘,并通过串行接口 RS-232,应用西欧核子研究中心 Kermit 软件传至计算机 VAX11/785 及 Micro VAXII,进行离线分析。

4. 温控装置

设计制造了可以容纳整个阵列和前端及触发电子学的温控装置:由四片半导体致冷片围在晶体四周,通过由可控硅元件组成的控制电路调节电流走向,以达到调节温度的目的。测试表明:在室温下,这个装置的温度调节范围为 $\pm 10^\circ\text{C}$,温控精度可达 $\pm 0.2^\circ\text{C}$ 。采用半导体数字温度计监测温度。

5. 监测定标方案

研究了两种适用于阵列单元监测的方案。制作了采用 CsI(Tl) 与 ^{241}Am 组成的稳定幅度脉冲光源(细节见 [7]),其 γ 等效能量对于 BGO 晶体约为 9 MeV,谱线宽度(FWHM)约为 8%,光脉冲计数率约为 3cps。与国外现有产品 NaI(Tl) + ^{241}Am 脉冲光源相比,采用 CsI(Tl) 代替 NaI(Tl),可进一步简化制作,并使源的性能更加稳定可靠。还试验了国产发光二极管(LED)用精密脉冲产生器驱动,并通过光纤系统传送到各路光电倍增管的监测方案。其优点是输出幅度和脉冲频率连续可调。在光电倍增管上的测试表明:在温度变化不超过 $\pm 2^\circ\text{C}$ 的环境中,LED 光输出的漂移四天内不大于 0.5%。

在 3×3 晶体阵列上,采用多种来源的单能 γ 射线进行了能量定标试验^[3]。测试确定:应用 γ 放射源和静电加速器(p, γ) 反应,对光电倍增管读出的 BGO 电磁量能器进行绝对和相对定标是实际可行的。

三、低能光子测量

基于 3×3 阵列测试的经验,应用 γ 放射源和静电加速器(p, γ) 反应产生的低能光子对 6×6 BGO 阵列进行了测试。

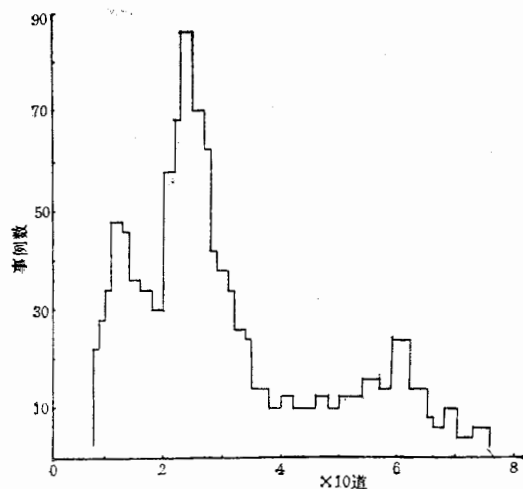


图 3 BGO 晶体对 ^{22}Na (0.511 MeV 和 1.27 MeV) 和 ^{137}Cs (0.662 MeV) γ 射线的响应

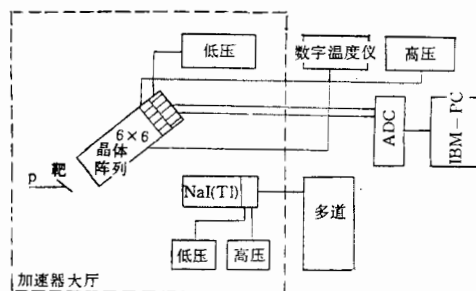


图 4 (p, γ) 反应实验安排示意图

表 1 选用的 (p, γ) 反应及有关数据

反应	E_γ (MeV)	质子共振能量 (keV)	质子工作能量 (keV)	靶
$^{19}\text{F}(p, \alpha\gamma)^{16}\text{O}$	6.13	340	700	LiF, 0.1mm 铜衬
$^7\text{Li}(p, \gamma)^8\text{Be}$	14.8 17.6	441	700	同上
$^{11}\text{B}(p, \gamma)^{12}\text{C}$	4.43 12.8 17.23	1390	1600	B, 12 μm , 不锈钢衬
$^3\text{T}(p, \gamma)^4\text{He}$	20.1 21.1 22.1	4000	900	T-T ₁ , 2,4mg/cm 钽衬

采用放射源 ^{137}Cs 和 ^{22}Na 的三组 γ 射线 (0.662, 0.511 和 1.27 MeV) 对阵列系统进行定标测量。测量时,放射源放在正对晶体顶端的位置上。典型的在线数据测量结果如图 3 所示。

在物理研究所的静电加速器上进行了 (p, γ) 反应实验。质子能量在 700 keV 至 2.9 MeV 之间可调,最大束流 0.5 μA 。核反应的基本数据汇集在表 1 中。表中还列入了测试用靶的情况以及每种反应相应的入射质子能量。由于静电加速器工作条件的限制,所用质子的能量与质子共振能量并不完全一致,这对 γ 射线的产额有影响。

实验安排如图 4 所示。全部用靶装入可从外面换位的靶室中。束流与靶平面呈 45° 角。束流在靶上产生的 γ 射线能量和强度利用一个直径 100 mm 厚 100 mm 的 NaI(Tl) 闪烁探测器通过多道脉冲幅度分析器进行监测。根据 NaI(Tl) 探测器测得的 γ 能谱选择对于每种靶合适的质子能量。图 5 是 BGO 阵列测得的各个反应的典型 γ 能谱。

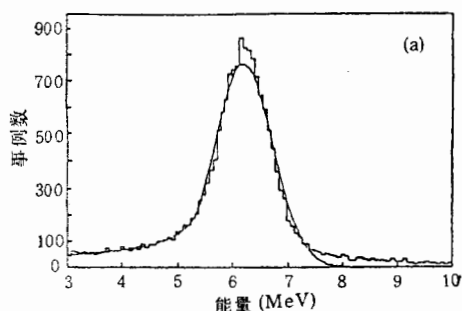


图 5(a) LiF (p, γ) 反应 6.13MeV 能谱

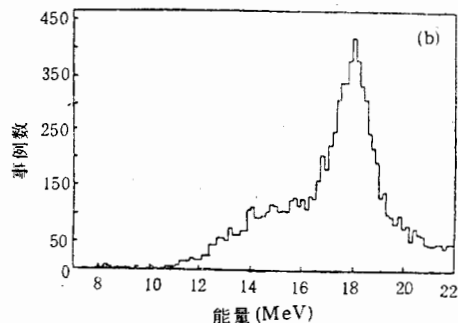
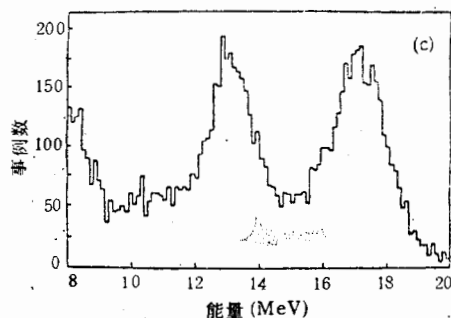


图 5(b) LiF(p, γ) 反应 17.6MeV 能谱

图 5(c) $^{11}\text{B}(p, \gamma)$ 反应 12.8 和 17.23MeV 能谱

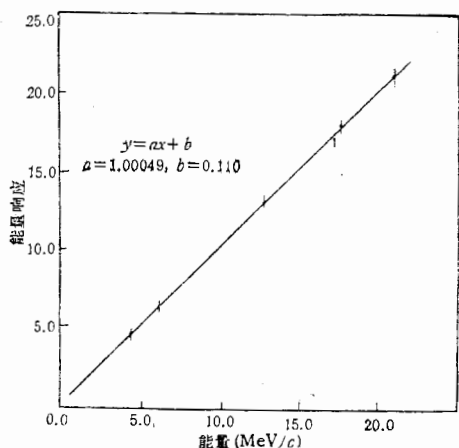
6×6 阵列探测器放在与束流成 135° 的位置上。实验前,应用随机触发开门获得每路 ADC 的台阶值。采用 ^{137}Cs 和 ^{22}Na 的三组 γ 射线对所有 36 路的每个单路进行定标,用最小二乘法拟合,得出每路的定标常数。为数据处理方便起见,实验时,仅将阵列中间四块晶体中任一块晶体的信号作为触发开门之用,这相当于将 γ 射线束流准直在阵列中间四块晶体上。数据分析时,将每路 ADC 的读出减去该路的台阶值,再乘以每路自己的定标常数,然后将 36 路的读数相加,即得出 BGO 晶体阵列对一定能量 γ 射线的能量响应。

为了了解本底情况,对 LiF 和 B 靶分别用它们的靶衬材料在相应质子能量下做了空靶测量。结果表明,可以忽略在 3MeV 以上的本底。

对图 5 中所有能谱采用高斯函数加上幂函数本底的形式进行拟合。根据第一次拟合得到的峰位及相应的均方根误差 σ 值,再对峰位周围 2σ 以内的数据拟合,得出最后的峰位和能量分辨率数据。如表 2 所列。

表 2 6×6 BGO 阵列探测器 (p, γ) 反应光子实验结果

$E_\gamma(\text{MeV})$	4.43	6.13	12.80	17.23	17.64	21.00
实验峰值	4.45	6.25	13.12	17.12	17.96	21.02
$(\Delta E/E)_{\text{FWHM}}(\%)$	22.01	15.82	12.14	11.45	10.45	11.31
σ	9.33	6.70	5.14	4.85	4.43	4.79

图6 6×6 阵列对 γ 射线的能量响应线性

利用表2中的数据,在图6中表出BGO阵列对 γ 射线的能量响应线性。在图7中表出阵列对 γ 射线的能量分辨率与 γ 射线能量的关系。应用最小二乘法对上述两图分别进行拟合,得出能量响应线性关系以及能量分辨率预期的 $E^{-\frac{1}{2}}$ 关系,后者是:

$$\Delta E/E = (30.34/\sqrt{E(\text{MeV})} + 3.59)\%$$

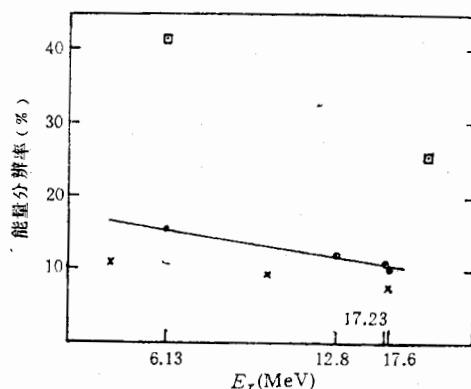
利用西欧核子研究中心的程序系统Geant 3.10,分别对高能范围和低能范围的光子及电子在 6×6 BGO阵列中的簇射分布,能量分辨及空间分辨性能作了蒙特卡罗模拟计算。在低能部份,计算结果和实验结果是符合的。

四、讨论

6×6 BGO晶体阵列电磁量能器模型,经过低能光子测量表明,整套装置工作正常,稳定可靠。实验结果还表明,对于采用光电倍增管读出的大型BGO电磁量能器,利用 γ 放射源和静电加速器(p, γ)反应进行能量定标是完全可行的。通过研制BGO阵列为建造大型全吸收电磁量能器装置提供了硬件和软件方面的实际经验。

在目前已经建成的BGO阵列中,我们建造的阵列是除了西欧原子核研究中心L3实验组之外最大的一个装置。由于采用光电倍增管读出,具有比由光电二极管读出好得多的信号噪声比。在已测的能量范围里,其能量分辨性能在国际同类装置中是最好的。

作为比较,图7同时表出了L3实验组采用光电二极管读出的 3×3 BGO阵列^[7]在这个能区测得的能量分辨率和入射光子能量的函数关系。图中还列入了碘化钠晶体球模型在这个能区的测量结果^[8]。可以看到,我们的结果显著好于L3的结果。和NaI(Tl)比较,BGO虽然在低能量下能量分辨不如NaI(Tl),但是,鉴于其能量分辨随能量按照 $E^{-\frac{1}{2}}$ 关系变化,而NaI(Tl)则按 $E^{-\frac{1}{4}}$ 关系变化,预期在较高能量下,BGO阵列将超过NaI(Tl)而有更好的能量分辨性能。在高能量下的实际测量^[9]已经直接表明了这点。

图7 6×6 BGO 阵列对于低能光子的能量分辨率与能量的关系

● 为实验点;实线为拟合结果;□为L3实验组 3×3 BGO阵列测试结果;×为NaI(Tl)晶体球模型测试结果。

我们将根据实验条件的可能性,扩充 6×6 阵列的测试能量范围。与此同时,这个阵列作为一个独立的装置已应用于在 $^{12}\text{C}(p, p')^{12}\text{C}^*$ 反应的退激过程中寻找低质量中性粒子的实验研究。

作者感谢上海硅酸盐研究所何崇藩、范世骥、廖晶莹等同志在提供 BGO 晶体材料方面给予的支持;感谢高能物理研究所一室、应用部物理室许多同志以及原子能科学研究院叶宗垣同志在实验条件方面给予的支援和帮助;感谢静电加速器运行组同志为 (p, γ) 反应实验提供长时间稳定束流以及在实验过程中的密切配合。

参 考 文 献

- [1] 何景棠等,高能物理与核物理,7(1983),766.
- [2] 王伟仔等,高能物理与核物理,10(1986),1.
- [3] 王伟仔等,高能物理与核物理,11(1987),16.
- [4] 何景棠,顾以藩,在核过程中寻找低质量中性粒子,自然科学基金申请书(1987).
- [5] 何景棠,顾以藩,寻找 π^0 放射性,自然科学基金申请书(1989).
- [6] 苗挺,中国科学院高能物理研究所硕士研究生论文(1988).
- [7] L3-Lyon Collaboration report, 1986.
- [8] G. I. Kirkbride et al., *IEEE Trans. Nucl. Science*, Vol. NS-26 No. 1 (1979), 1537.
- [9] J. A. Barken et al., CERN-EP/86-152,1986

CONSTRUCTION OF A 6×6 BGO ARRAY AND ITS MEASUREMENT OF LOW ENERGY PHOTONS

GU YIFAN HE JINGTANG MIAO TING QIAN ZHONGMIN
YU LING ZHU GUOYI

(*Institute of High Energy Physics, Academia Sinica*)

ABSTRACT

A 6×6 BGO array as a prototype of precise fully active electromagnetic calorimeter has been constructed. It consists of 36 Chinese-made BGO crystals, each being 20mm by 20mm in cross section and 200mm in depth, equipped with photomultiplier readout. To obtain linearity over a wide dynamic range, both the anode signal and a dynode signal were digitized. The array has been tested with monochromatic photons produced via (p, γ) reactions at the IHEP Van de Graaff accelerator in the energy range up to 21MeV. The response for photons has shown to be linear in this energy range. The FWHM energy resolution obtained follows a $E^{-1/2}$ dependence and is superior to that of BGO arrays reported in the literature.