

图4 $^{208}\text{Pb}(n, \gamma)$ 反应截面

发射光子的波数。 j_i 和 m_i 是初态总角动量及其磁量子数。 m_f 是末态总角动量的磁量子数。

用(4)式我们作过计算^[7]。 Hideo Kitazawa^[8] 等人计算了 $^{208}\text{Pb}(n, \gamma)^{209}\text{Pb}$ 反应的总截面, 见图4, 图中的黑点为实验点, 穿过黑点的竖线是实验误差, 连续曲线是实验误差^[8]。

从图4计算曲线与实验符合的程度来看, 这比单纯的直接辐射俘获理论, 或复合核统计理论的计算结果都好得多。 这就说明了 SJ 模

型是正确的。 特别是最近发现了单极巨共振, 进一步证实了 SJ 模型的正确性。

通过对原子核巨共振的研究, 不仅能解释实验上发现的巨共振现象, 从而使我们加深了对核物质, 核结构的认识; 同时用巨共振的模型理论计算出了有用的核数据, 为核工程技术上的辐射防护提供了有价值的参考资料。 因此, 对原子核巨共振问题的研究, 是具有重要现实意义的。

最后, 作者对孙汉城同志的有益建议和提供的图2, 表示感谢。

参 考 文 献

- [1] Fred E. Bertrand, *Ann. Rev. Nucl. Sci.*, **26** (1976), 457.
- [2] G. C. Baldwin and G. S. Klaiber, *Phys. Rev.*, **71** (1947), 3.
- [3] A. B. Migdal, *J. Phys. USSR*, **8** (1944), 331.
- [4] M. Goldhaber and E. Teller, *Phys. Rev.*, **74** (1948), 1048.
- [5] H. Steinwedel and J. H. D. Jensen, *Z. Naturforsch.*, **5a** (1950), 413.
- [6] C. F. Clement and A. M. Lane, *Nuclear Phys.*, **66** (1965), 273.
- [7] 马中玉, 高良俊, 核反应理论方法及其应用文集, 原子能出版社, (1980), 192.
- [8] Hideo Kitazawa and Nobuhiro Yamamuro, *JAERI-M 5984*, (1975), 137.
- [9] Nguyen Van Giai and H. Sagawa, *Nucl. Phys.*, **A 371** (1981), 1.

锗酸铋 ($\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$) 单晶闪烁体

赵 静 安

(清 华 大 学)

1965年, Nitsche^[1] 第一次拉成锗酸铋(以下简称 BGO) 单晶。 然而把 BGO 单晶作为闪烁体来进行研究, 其历史却还不到十年。 1973年, Weber 等人^[2] 首先用 X 射线激励, 研究了它的发光机理和荧光特性。 1977年, Cho 等人^[3] 对 BGO 和 NaI(Tl) 闪烁体用于探测低能核辐射进行了比较, 指出: 由于 BGO 具有较

大的有效原子序数和密度, 与 NaI(Tl) 相比, 在晶体体积相同的条件下, 检测效率要高得多, 即空间分辨率高; 余辉极小, 可以提高检测扫描速度; 机械强度较大, 无解理性, 可以加工成多种形状; 不会吸湿潮解, 不必进行象 NaI(Tl) 那样的特殊密封, 这样不仅可降低造价, 而且有利于空间分辨率的提高。 BGO 闪烁体主要缺

点是对低射线来说,能量分辨率差些和造价高些。1980年,Evans^[4]用直径38mm、长38mm的BGO单晶为探头,对 γ 射线能量为8.28MeV区域内进行检测实验,以及1981年Drake等人^[5]用直径76mm、长76mm BGO单晶为探头,在 γ 射线能量为4.44 MeV、12.71 MeV, 15.11 MeV和21.96 MeV的区域内进行检测实验,均表明,前面指出的BGO在低能区域中的优点仍然存在,同时, γ 射线能量越高,这两种晶体探头的能量分辨率就越接近。同时发现在进行高能 γ 射线测量时,由于BGO对本底中子和宇宙射线灵敏度低,还有利于降低本底噪声的影响。

本文除了介绍BGO闪烁体的性质以外,还列举了BGO闪烁体在低能和高能辐射测量方面的两个应用实例,用以说明BGO闪烁体的优点和应用前途。

一、BGO单晶

常见的BGO单晶有两种, $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ 和 $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ 它们的物理性质有很大差别,这里只介绍 $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ 单晶。这种单晶是以纯度为99.999%的 Bi_2O_3 和 GeO_2 为原料,按 $\text{Bi}_2\text{O}_3:\text{GeO}_2=2:3$ 的摩尔比配料,混合均匀,放在铂坩埚中加热熔化,熔点 1045°C ,用提拉籽晶法生长单晶,提拉速度约为5mm/h,转速约为70转/min。图1示出的是直径为58mm、厚为135mm、重为3.5kg的 $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ 单晶实物。

BGO是一种立方晶体,无色透明,折射率

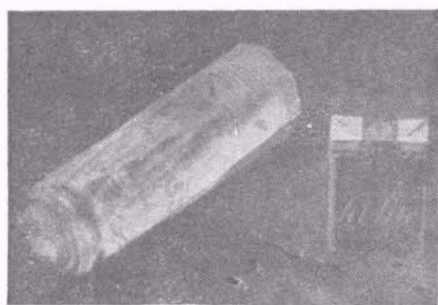


图1 $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ 单晶实物照片

物理

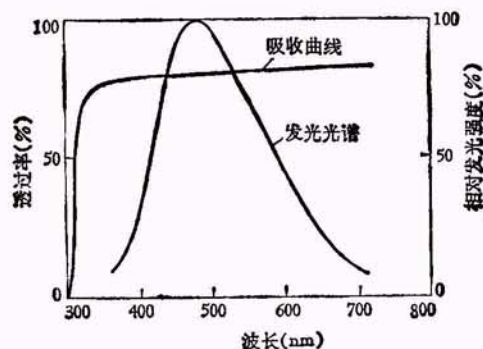


图2 $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ 的吸收曲线和发光曲线

为2.15(在光波长为480nm时)。由于晶体中有铋原子,其原子序数为83,所以晶体的有效原子序数较高。晶体的密度为 $7.13\text{g}/\text{cm}^3$ 。

吸收曲线(见图2)是用0.8mm厚的BGO单晶测出的,其吸收端为300nm。用313nm波长的光激发晶体,其发光光谱(见图2)大约在350—680nm范围内,最大荧光波长在480nm处,是 Bi^{3+} 离子吸收激发光子之后,由 $^3p_1 \rightarrow ^1s_0$ 和 $^1p_1 \rightarrow ^1s_0$ 跃迁给出的^[2]。这个波长范围的荧光,从BGO单晶透射出来,由于BGO的折射率较大,仅为荧光强度的75%,因此,采用这种晶体为闪烁体时,必须选择适当的光学耦合剂或特殊的结构形式,才能更多地把晶体中的荧光“引出”来。

在用直径为20mm、高为20mm的BGO为闪烁体时,测量 ^{137}Cs 的能谱(见图3),得到的能量分辨率约为14%,为相同尺寸NaI(Tl)闪烁体的两倍。BGO闪烁体的相对发光效率

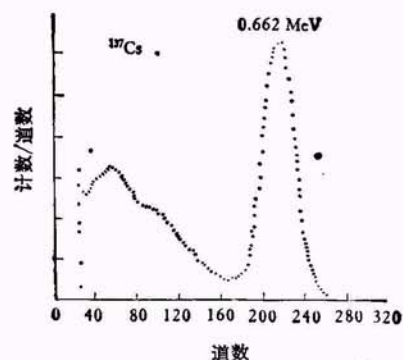


图3 用BGO为闪烁体测得的 ^{137}Cs 的能谱

表1 BGO 与 NaI(Tl) 性能比较^[4]

	性能	Bi ₄ Ge ₃ O ₁₂	NaI (Tl)
力学性能	密度(g/cm ³)	7.13	3.67
	有效原子序数	74	50
	硬度	~5(相当于软玻璃)	~2(相当于岩盐)
	解理性	无	100
化学性能	稳定性	好	差
	潮解性	无	有
光学性能	折射率(在光波长为480nm时)	2.13	1.85
	吸收90%的X射线(0.15MeV)的厚度(mm)	2.3	10.4
	吸收90%的γ射线(0.511MeV)的厚度(mm)	24.4	67.1
	最大荧光波长(nm)	480	420
闪烁性能	荧光输出额(%)	12	100
	3秒后的余辉(%)	<0.005	0.5-5
	上升时间(ns)	50	50
	下降时间(ns)	300	250
	光输出的温度系数(%/°C, 在25°C)	1.0-1.5(-)	0.22-0.9(+)
	能量分辨率(%)		
	0.662MeV 时	14	7
	4.44 MeV 时	6.8	5.2
	15.11MeV 时	3.8	2.3
21.96MeV 时	3.5	2.1	

(用光电倍增管的阳极输出幅度大小比较), BGO 闪烁体为 NaI (Tl) 闪烁体的 12%。

BGO 闪烁体的一些其它性质示于表 1。

二、BGO 闪烁体在低能辐射探测方面的应用

BGO 闪烁体首先得到实际应用的是在医学方面^[6]。虽然 BGO 用于低能核辐射探测器有几项物理性能(如荧光输出额和能量分辨率)不如 NaI (Tl), 并且该晶体的市场价格大于 NaI (Tl) 几倍, 但是由于 BGO 的有效原子序数大、密度大以及发光的时间特性好等优点, 对于那些需要检测效率高、空间分辨率好、检测扫描速度快的工作, BGO 闪烁体的优越性就比较突出了。

日本科学技术厅放射性医学综合研究所^[7]等单位共同研制出的计算机断层分析正电子摄影装置, 就是把 ¹¹C, ¹³N 或 ¹⁵O 等放射性元素服于人体中, 用上述装置确定放射性元素的位置, 并能跟踪它在人体内运动的状况。在这个装置中, 用了 64 个 26 × 20 × 12cm³ 的 BGO 闪烁体, 不均等地装配在直径为 44cm 的圆周上, 利用计算机控制这组检测群。当它旋转一周, 便可测出放射性在旋转断面上的位置。这个装置的位置分辨率为 6mm, 时间分辨率为 5.3ns, 能量分辨率为 26% (对 ¹¹C, 511keV)。

三、BGO 闪烁体在 高能 γ 射线探测方面的应用

在探测高能 γ 射线时, 对探测器有以下要求: 对高能 γ 射线探测效率要高; 对本底中子及宇宙线的灵敏度要低; 能量分辨率和时间分辨率要好。

Drake 等人^[5]根据上述要求, 对直径为 76mm、厚为 76mm 的 BGO 和直径为 152mm、厚为 254mm 的 NaI (Tl) 进行了对比实验, 图 4 是 17MeV 质子的 ¹²C(p, p'γ)¹²C 反应, 以 NaI (Tl) 和 BGO 为闪烁体, 利用反符合和积

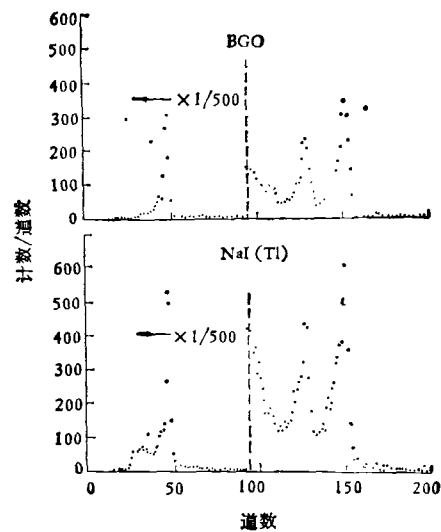


图 4 17MeV 质子的 ¹²C(p, p'γ)¹²C 反应, 上图是 BGO 探测器的 γ 谱, 下图是 NaI(Tl) 探测器的 γ 谱

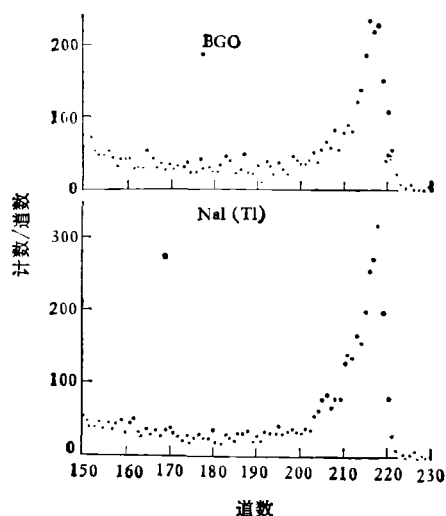


图5 9MeV 氚的 ${}^3\text{H}(t, \gamma){}^4\text{He}$ 反应的 γ 谱的高能部分, 上图是 BGO 的, 下图是 NaI(Tl) 的

分入射电荷归一化的方法测量。相应于 ${}^{12}\text{C}$ 的跃迁, 其 γ 射线的能量分别为 4.44MeV, 12.71 MeV 和 15.11MeV。图 5 是 9MeV 氚的 ${}^3\text{H}(t, \gamma){}^4\text{He}$ 反应, 与上述的实验条件和方法类似, 其跃迁的 γ 射线能量为 21.96MeV。从图 4 和图 5 可知: (1) 4.44MeV 跃迁全能峰的强度, 在 BGO 谱仪中约为在 NaI (Tl) 谱仪中的 60%, 而在 15.11MeV 和 21.96MeV 处, 其对应的强度比 (为了免除单逃逸的贡献, 只用峰的上半部分) 分别为 70% 和 105%, 虽然 NaI (Tl) 比 BGO 要厚 3 倍, 但它们的全能峰的强度比却接近于 1。(2) 4.44MeV 的能量分辨率: BGO 是 6.8%, NaI(Tl) 是 5.2%。15.11 MeV 的能量分辨率: BGO 是 8%, NaI (Tl) 是 2.3%。21.96MeV 的能量分辨率: BGO 是 3.5%, NaI (Tl) 是 2.1%。随着 γ 射线的能量增高, 它们的能量分辨率越接近。

另外, Drake 等人又作了两种晶体谱仪对本底灵敏度的实验研究。图 6 表示在未加时间和反符合的 17MeV 质子 ${}^{12}\text{C}(p, p'\gamma){}^{12}\text{C}$ 反应的 γ 的高能部分谱中, 在道数为 100—115 的区域内, NaI (Tl) 谱仪的本底水平相对要高些, 这个区域的本底主要贡献者是中子。在 BGO 谱仪的 106 道处显示出一个峰, 它是 ${}^{12}\text{C}$

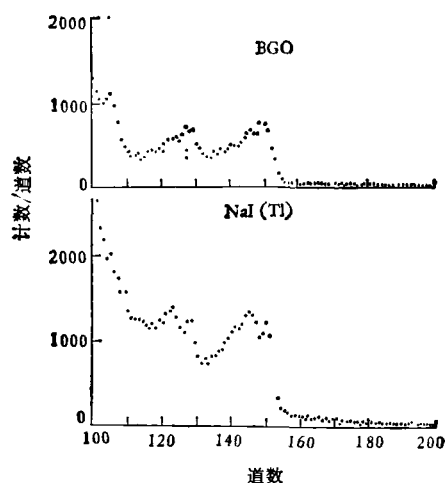


图6 17MeV 质子 ${}^{12}\text{C}(p, p'\gamma){}^{12}\text{C}$ 反应的 γ 谱的高能部分, 上图是 BGO 的, 下图是 NaI(Tl) 的

衰变图中的 15.11 MeV \rightarrow 4.44MeV 跃迁, 而这个跃迁信息在 NaI (Tl) 谱仪中是不能与本底区别开的。在道数为 180—200 区域内的计数均为本底, 主要贡献者是宇宙射线, 而在 BGO 谱仪中的计数比在 NaI (Tl) 谱仪中减小 7 倍。

上述实验还证明, 在 10MeV 以上的高能区域 ($\geq 10\text{MeV}$), BGO 和 NaI (Tl) 的谱仪时间分辨率没有差别, 约为 3ns, 这个时间分辨率对大部分的应用工作是足够的。

最近几年对 BGO 闪烁体及其应用的研究逐渐增多, 目前尚不能得出这样的结论, 就是用 BGO 来代替三十年来应用极为广泛的 NaI (Tl)。但是, 随着核辐射探测技术的发展, 在一些有特殊(包括精确度)要求的实验与应用领域, BGO 将代替 NaI (Tl)。

参 考 文 献

- [1] R. Nitsche, *J. Appl. Phys.*, **36** (1965), 2358.
- [2] M. J. Weber and R. Monchamp, *J. Appl. Phys.*, **44** (1973), 5496.
- [3] Z. H. Cho and M. R. Farukhi, *J. Nucl. Med.*, **18** (1977), 840.
- [4] A. E. Evans, *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, **NS-27** (1980), 172.
- [5] D. M. Drake et al., *Nucl. Inst. Meth.*, **188** (1981), 313.
- [6] 石井 满、秋山清吉、高木一正、高见胜已、石松健二, 日立评论, **62**(1980), 797.
- [7] N. Nohara et al., *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, **NS-27** (1980), 1128.