

新型闪烁材料: 锗酸铋 (BGO) 晶体

何 崇 藩

(上海硅酸盐研究所)

一年前,中国科学院上海硅酸盐研究所研制生产的锗酸铋 ($\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$, 简称 BGO) 晶体在国际科技界获得了很高声誉,在产品质量、尺寸和数量上都取得了领先地位。1985 年美国国家科学基金会在康耐尔大学对各国的 BGO 产品进行评比时,给硅酸盐所的产品打了唯一的一个满分。著名美籍华人科学家丁肇中教授在给该所的信中说:“我们已将你所寄来的很多晶体进行了各种试验。我们高兴地告诉你们,这些晶体的光学质量是均匀的,有抗辐照能力,特别重要的是它们具有对低能量光子和电子的优越的能量分辨率。我们认为你们的晶体是优于日本或欧洲的晶体。”在我院 1986 年初表彰和奖励的“六五”攻关成果中,BGO 是 28 个得重奖项目中的一项。

什么是 BGO

BGO 是一种具有立方结构,无色透明,不溶于水的无机氧化物晶体。它在高能粒子或高能射线 (γ 射线、X 射线等) 激发下可以发出峰值为 480nm 波长的绿色荧光。它的发光机制是 Bi^{3+} 最外层电子受 γ 射线或 X 射线激发后发生 $^3\text{P}_1 \rightarrow ^1\text{S}_0$ 跃迁,而产生荧光,称之为闪烁。这是一种光-光功能材料,从它的这种特性,可以用来制造种种用于高能粒子和高能射线的探测器。

简短的开发史

BGO 是一种人工合成矿物。1957 年 Durif 首先通过固相反应合成 BGO 多晶体,1965 年瑞典人 Nitsche 开始用无坩埚法生长出第一支 BGO 单晶体,1969 年 Johnson 等人生长出掺钕 (Nd) 的 BGO 单晶,均因电光性能一般或穿透太浅,效率不高,未能投入应用。直到 1974 年 Nestor 和 Huang 从寻找新型闪烁材料出发,研究了 BGO 的闪烁性质,第一次指出,这是一种很有希望的闪烁材料,可以用来制造 γ 射线探测器。1975 年美国加州大学 Cho、Derenzo 和 Farukhi 等人先后把 BGO 用于 X 射线断层扫描仪 (XCT) 和正离子发射断层扫描仪 (PCT)。从此, BGO 开始进入了工业应用时代。1980 年 Evans 又把 BGO 从低能应用领域扩展到高能核物理领域,用于快中子增殖反应堆的监控。但真正促进 BGO 工业发展的动力来自西欧核子研究中心 (CERN)。1981 年该中心以丁肇中教授为首的 LEP-3 合作组提出了建造 BGO 量能器的计划,需要 $3 \times 3 \times 2 \times 2 \times 24$ 厘米的大晶体 12000 支 (约 13 吨)。1982 年美国能源部和国家科学基金会为了促进 BGO 的研究工作,在美国普林斯顿大学召开了第一次国际 BOG 专门会议,据会议估计全世界近年内需要 BGO 达 20 吨之巨,从而更加促进了对 BGO 的研究和生产的进展。

在我国,对 BGO 的研制起步稍晚一些。上海硅酸盐所的研究人员,凭借他们在晶体生长

方面扎实的理论知识和经验,在过去研制合成云母等所积累的生长单晶材料的资料和工艺的基础上,于 1982 年 2 月开始进行 BGO 晶体的研究工作。当时的应用目标是 X 射线断层扫描仪,所需用的晶体体积很小,不到一年即获得满意结果。1983 年初,针对西欧核子研究中心所提出的要求,在实验室研制大尺寸 BGO 晶体。通过反复实践,确定了一条能同时解决大尺寸、高质量、低成本又适合于大量生产的 BGO 生长技术路线和方法,并于 1983 年 12 月通过院级鉴定。1984 年初即在我院上海嘉定新型无机材料中试基地进行中间试验,逐步扩大成批量生产。1984 年 9 月到 1985 年 6 月已售给美国康耐尔大学威尔逊实验室 184 支晶体,用于 CESR 对撞机的电磁量能器晶体。这是目前第一个已建成的 BGO 量能器,经投入使用后,获得预期的提高精度的效果。1985 年 2 月西欧核子研究中心与上海硅酸盐所订了第一个提供 4000 支 BGO 大晶体的合同,同年 11 月又订了第二个提供 3840 支大晶体的合同,合同规定这 7840 支晶体必须在 1988 年内提供完毕。由于质量好、价格合理,我所的 BGO 产品已占当前国际市场一半以上。国内已开始采用。我院高能物理所已用我所提供的 BGO 晶体建成 6×6 阵列,为建立 BGO 晶体球探测粲介子、粲重子,研究胶子物理作准备。其它如原子核研究所、生物物理所、清华大学以及地质石油部门等亦都向我所购买晶体进行试验。

特 点 与 性 能

NaI 晶体是最常用的闪烁材料,它的单位体积的价格只有 BGO 的五分之一,而且发光效率比 BGO 高出好几倍,那末,为什么人们仍然愿意使用 BGO,当然是有其原因的。

一、近 25 年来,实验高能物理上的重大突破,例如: J 粒子、T 粒子及最近的 Z^0 粒子和 W^+ 粒子的发现,都与轻子和光子的精密测量紧密相关。现今实验物理的主要目的,不是去证实特殊理论或某些预言,而是如何寻找对轻子和光子具有最优良分辨能力的探测器去探索未知。经西欧核子研究中心 LEP-3 小组实验证实 BGO 在高压区的能量分辨率精度达到 1%,比其它探测器几乎高出一个数量级。可以期望 1988 年 BGO 量能器建成之日,可能是许多未知粒子被发现之时,为实验物理学家预示了诱人前景。

二、BGO 原子序数高,密度大,阻止射线的能力强。由于有这个特点,使制造功能一样而体积紧凑的小型量能器成为可能,从而大大节约了投资。据计算,LEP-3 电磁场量能器直径每增加 1 厘米,就要增加 200 万瑞士法郎的外围设备投资。用 BGO 制造 XCT 或 PCT 探测器,由于尺寸小,大幅度提高了仪器的空间分辨率。用 BGO 做反康普顿谱 γ 能谱仪,也是由于体积小,使锗探测器更靠近靶子,开角大,在相同距离内可以放置更多的锗探头,因而提高了能谱仪效率和精度。

三、BGO 机械强度高,不潮解,因而容易加工,维护和使用都方便,不需要特殊的防潮措施,硬件设计大为简化,而且使用寿命长。

BGO 的应用

BGO 晶体的应用领域正在逐渐扩大,除了应用量最大的高能物理领域外,核物理、空间物理、核医学、地质勘探以及其它各种工业应用均在发展。下面分别举例说明。

高能物理:

BGO 是建造各类对撞机的电磁量能器的重要材料。西欧核子研究中心大型正负电子对

撞机的 hEP-3 电磁量能器是精确测量轻子和光子的设备,其中应用了 $3 \times 3 - 2 \times 2 - 24$ 厘米的 BGO 大单晶 12000 支;美国康乃尔大学威尔逊实验室 CESR 对撞机的 CHSB 电磁量能器,使用了 250 支 BGO 晶体,改善了原有 NaI(Tl) 量能器的分辨率,达到 3% 的精度,获得了预期的使用效果。

我院高能物理研究所,已用 36 支 BGO 晶体建成 6×6 列阵,为建立探测粲介子、粲重子的 BGO 晶体球,进行胶子物理研究作准备。

此外,在双光子物理、 γ 能谱仪、 β 介子物理等研究中,都在拟议使用 BGO 探测列阵。

核物理:

加拿大原子能有限公司在研究重离子物理中发现,用 BGO 制造 4π 探测列阵,可以提高 r /中子检测率。

匹茨堡大学和南加州大学用 BGO 作反康普顿屏蔽 γ 能谱仪,其脉冲比是 NaI(Tl) 的 2 倍,是一种很好的全能量探测器。

国外也还有的研究单位将 BGO 用于核谱测量,或作为高能 (20 MeV) 探测器等。

空间物理:

用于制造 γ 射线探测器。美国佛罗里达空间天文实验室建造了一种先进的空间 γ 射线探测器 (G-RAD),其中使用了 BGO 和另一种新材料,1982 年在航天飞机上进行了试验。

还有,美国洛斯阿托莫斯国家实验室建造了一种 BGO 电子能谱仪,放在同步卫星轨道上,用来测量空间的 2.5—10 MeV 高能电子谱。

核医学:

用 BGO 作 X 射线断层扫描仪 (XCT) 的探头,可使探头数目增加到数千个,改善了仪器的分辨率,提高了速度,是 1972 年发明的一项医疗技术。我国上海医疗器械研究所已用国产的 BGO 研制成功脑颅 XCT,临床应用中取得了很好的医疗效果。

利用 BGO 计数效率高 (是 NaI(Tl) 的 4 倍) 的特点,可以广泛取代 NaI(Tl) 用作各种 γ 计数器的探头。

工业应用及其它:

用于核燃料扫描仪:美国国家核子公司,应用 BGO 作该类扫描仪的探头,提高了仪器的空间分辨率和测定衰减之前的 γ 射线的能力,并简化了装置。

用于核测井:以 BGO 取代 NaI(Tl) 用于油井探测,取得了很好的效果。在进一步解决井下温升等技术问题之后,BGO 在测井技术中的应用将取得突破,并大大促进测井技术的发展。

除此以外,BGO 还可在近代测量密度的量规中得到应用;它是各向同性的晶体,无色透明,折射率高,可能在光学镜头上得到广泛应用;它的磁光常数很高,是石英的 7 倍,重玻璃的 2 倍多,也是一种优良的潜在磁光材料。