

# 正电子发射断层成像系统中 BGO 晶体的研究\*

程绍臣 赵永界 李学军

(中国科学院高能物理研究所, 北京 100039)

**摘要** 介绍了我们对 BGO 晶体性能的测试、工艺处理过程的研究, 以及由此构成的探测器在我国自行研制的第一台商品 PET 上的应用。

**关键词** BGO 闪烁探测器, 能量分辨率, 空间分辨率

## 1 引言

BGO 是一种新型的无机闪烁晶体, 其分子式为  $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ 。它的平均原子序数高, 密度大 ( $7.13\text{g/cm}^3$ ), 对  $\gamma$  光子有较大的阻止本领 ( $dE/dx = 8.0\text{meV/cm}$ ) 和光转换效率 ( $2.8 \times 10^4 \text{ phs/meV}$ )。它对  $\gamma$  射线的吸收系数是 NaI(Tl) 的 2.5 倍左右。为了获得对  $\gamma$  射线的相同的吸收效率, BGO 的线性尺寸比 NaI(Tl) 可减小 60% 左右, 而整个体积的缩减达 93.6%<sup>[1]</sup>。它的发射光谱中心波长为 480 nm, 与普通光电倍增管的光谱响应相匹配<sup>[2]</sup>。BGO 可以用于任何空间有限而要求对  $\gamma$  阻止本领大的场合。由于它有吸收系数高、余辉低、化学性能稳定、硬度适中、不潮解和易于加工等特点, BGO 晶体在高能物理和核医学探测仪器中得到了广泛的应用。

正电子发射断层成像系统 (PET), 是先对人体注入含发射正电子同位素的标记化合物 (如 F-18-FDG 等), 探测正电子湮没所产生的  $\gamma$  光子, 利用计算机进行重建运算得到同位素浓度分布的断层图像。由于各种同位素标记化合物对人体内各种组织的亲和作用不同, (如 NaF 亲骨组织), 所以, 通过这种同位素的分布就可以对人体进行医学诊断。我们采用 BGO 晶体研制的探测器成功地应用到样机和商品机器 PET-B01 上。目前 PET-B01 在中日友好医院已经做了大量的临床诊断和研究工作。

## 2 BGO 晶体在探测器中的应用

PET 系统的探测器是实现整机性能的关键, 一直是 PET 研究设计的焦点, 它决定了系统可能达到的极限空间分辨率、探测效率、信噪比以及整机性能价格比等。BGO 晶体是探测器中直接与射线发生作用的部分, 它对事例的接收、判断到光信号的传输等过程起决定性作用。

### 2.1 BGO 晶体形状与尺寸的确定

在占据同样的空间条件下, 正方形晶体的探测面积是圆形的  $4/\pi$  倍, 不仅如此, 方形和矩形截面的晶体便于封装、屏蔽和固定, 这对提高探测器的效率也是十分重要的。一般认为, 方形晶体固有空间分辨率约为探测器单元几何尺寸的 0.5 至 0.6 倍, 由此确定晶体的高度和宽度。而晶体长度的选择是根据  $\gamma$  光子有效能量转换长度来确定。BGO 晶体在得到 511 keV 能量时, 其吸收系数约为  $0.9 \text{ cm}^{-1}$ 。设计时按吸收 90% 以上的能量计算, BGO 晶体的长度应当选在 25 mm 左右。为获得较高的探测效率, 提高计数灵敏度, 可适当加长晶体。因此, PET-B01 的 BGO 晶体尺寸定为  $8 \times 18 \times 30 \text{ mm}^3$ 。

### 2.2 BGO 晶体处理方式对探测器的影响

对同一块 BGO 晶体, 经过六面抛光和五面 (与光电倍增管耦合面抛光) 磨毛的两种处理

\* 1995 年 1 月 9 日收到初稿, 1995 年 6 月 20 日收到修改

方法,在同一套多道脉冲分析系统上进行测试研究,其结果是 BGO 晶体表面全抛光的探测器,脉冲幅度优于磨毛晶体 30% 左右,能量分辨率也较好.如图 1 所示.

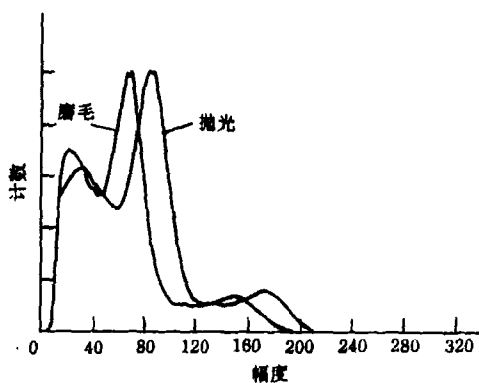


图 1 同一块 BGO 晶体表面处理试验比较

可能是由于表面全抛光晶体收集闪烁光比较完全,减少了光在反射过程中的损失.实验表明, BGO 晶体在既有全反射又有漫反射的光传输方式时,其能量分辨率较好.

光反射材料的选择也非常重要.在对国产氧化镁粉、二氧化钛粉等进行研究配制过程中,得到了与英国 NE 公司生产的 BATCH# 5901 很接近、附着能力很强的光反射剂.采取特殊工艺,涂层厚度可非常均匀地控制在 0.1 mm 左右.

BGO 晶体的折射系数为 2.1,光电倍增管窗面玻璃的折射系数为 1.4,我们选用了折射系数为 1.7 且较为粘稠的硅脂作为光耦合剂收到了较好的效果.

### 3 BGO 晶体探测器的性能指标

作为 PET 系统的探测器,应当具有良好的能量分辨率、时间分辨率和空间分辨率等性能指标.

#### 3.1 能量分辨率

在 PET 中,是靠 BGO 晶体的能量分辨率把对成像有用的全能量的光子和无用的散射光子等区别开来的.要提高探测系统的能量分辨

率,首先要选择透明度好、发光效率高的闪烁体,并要严格控制晶体的封装工艺,保证反光层的作用.还要选择一个各种性能指标好且稳定的光电倍增管匹配使用.图 2 是我们采用 8mm × 18 mm × 30 mm 的 BGO 晶体为 PET-B01 制做的探测器能谱图,能量分辨率为 20%.

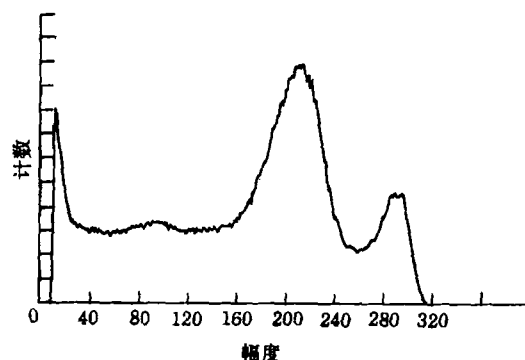


图 2 PET-B01 能量分辨率测试曲线

#### 3.2 空间分辨率

由正电子湮没而产生的双  $\gamma$  光子的运动方向接近  $180^\circ$ ,只有系统上相对的两个探测器接收到的  $\gamma$  光子,才可能是真实事件的光子.为消除其它  $\gamma$  光子的影响,就必须考虑探测器的空间效应,同时为了确定实际应用时系统能够诊断的最小区域,也必须考虑系统的空间分辨率.空间分辨率的测定是利用双  $\gamma$  光子的符合技术,移动处于两探测器间的同位素点源,随其位置变化,符合计数具有一分布,它的半高宽就是系统的空间分辨率.它由三个因素决定,即探测器对的固有分辨率、采样频率和图像参数.其中探测器的固有分辨率决定了一特定 PET 系统的极限分辨率.由文献[3]可知,当 BGO 晶体由 8mm × 20mm × 30mm 改变为 5mm × 20mm × 30mm 时,后者的光峰效率损失约 40% 左右,能量分辨率也由 25.4% 下降到 30.9%.从 PET 系统上的探测器对应关系来看,当  $\gamma$  射线偏离  $90^\circ$  入射时,探测器的效率会明显下降.从总体方案看[如图 3(a)],PET 重建图像的有效视野(FOV)约占探测器直径的一半,因此,在 FOV 最边缘的一对探测器,所产生的投影线与

晶体入射面垂线夹角,最大为  $\theta=30^\circ$ ,如图 3 (b) 所示. 理论计算表明,  $\theta=30^\circ$  时, BGO 晶体对  $\gamma$  射线能量的吸收只有直射入的 55%. 需要在图像重建之前对正弦图进行效率归一化校正. 更为严重的问题是射线的穿透效应,如图 3 (a) 所示,即射线穿过 B 晶体到达 C 晶体就会被误判为 CD,而不是 AB,这样就使得图像的径向分辨率在 FOV 边缘变坏. 克服的办法是, BGO 晶体的径向宽度不宜太窄,并要在两块晶体之间加上钨或铅屏蔽,以减小  $\gamma$  射线的穿透作用.

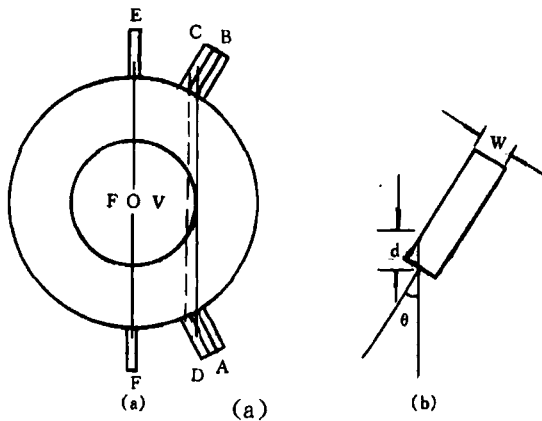


图 3 系统探测器的对应关系

探测器对的固有分辨率测试方法如下:在垂直于探测器连线方向上以 1 mm 的步距移动点源,在每一点上测得符合计数率,得到的计数曲线即是点扩散函数 (PSF),其半高宽 (FWHM) 常用来表示固有分辨率. 但由于放射源对探测器接收面所张的立体角差异,所以,源在相对于探测器对的不同位置, PSF 将不同. 图 4 是 PET-B01 探测器对中心、头部有效视野边缘和全身有效视野边缘的测试结果,中心位置分辨率 5 mm; 头部成像 FOV 边缘分辨率 5.3mm; 全身成像 FOV 边缘分辨率 5.5mm; 离散度 10%.

### 3.3 时间分辨率

时间分辨率是指系统能够区别的相继发生的两个入射  $\gamma$  光子之间的时间间隔,是表征系统定时分辨能力的参数. PET 系统探测的是正

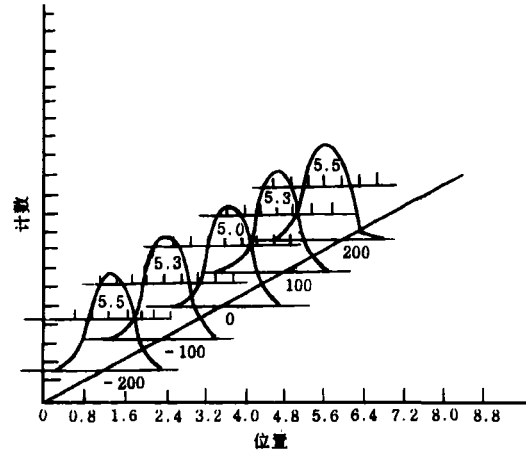


图 4 PET-B01 空间分辨率测试曲线

电子湮没时发生的双光子事件,由同一事件发出的两个  $\gamma$  光子分别到达两探测器的时间差是很小的,而两个非关联的  $\gamma$  光子到达两探测器的时间差是较大的,我们设定时间甄别阈,把真实的同一双光子事件的  $\gamma$  光子和其它  $\gamma$  光子区别开来.

由于系统时间不稳定性,时间差可有较小晃动,在多道上呈现一个分布曲线,其半高宽就是系统的时间分辨率. 图 5 示出了 BGO 晶体探测器在 PET-B01 系统上测得的时间分辨率为 5 ns.

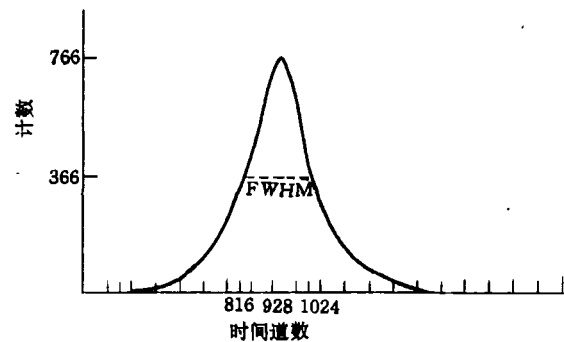


图 5 PET-B01 时间分辨率测试曲线

BGO 晶体在我们自行研制的 PET 系统上得到了应用,并获得了较好的效果,为我国核医学事业注入了新的生机. 我们目前在进一步研

究 BGO 晶体,为研制第二台四环全身 PET-B02 作准备.

**致谢** 在我们进行 BGO 晶体实验过程中,电子学方面得到了王培良和张波等同志的大力支持,在此表示感谢.

## 参 考 文 献

- [1] 汲长松,核辐射探测器及其实验技术手册,原子能出版社,(1990),293.
- [2] 何景棠等,高能物理与核物理,7(1983),766.
- [3] C. Nahmias, D. B. Kenyon and E. S. Garnett, *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, NS-27-1(1980),529.
- [4] 唐孝威,粒子物理实验方法,高等教育出版社,(1982),107.

## 评《非线性动力学(混沌理论)概要》一书

某些完全确定性的动力学系统,在没有任何外加的随机性扰动的情况下,便能出现与随机过程(如 Brown 运动)难以区分的动力学行为,这类现象被概括为一个在中西文化中渊源流长的词语:混沌.混沌等非线性动力学问题的探索,不仅是理论物理中的重要组成部分,而且它打破了学科界限,渗透到其他物理分支和物理学科之外的其他学科.在这种背景下,向理论物理之外的科技工作者普及混沌理论知识无疑是很必要的,并且已有一些尝试,而 R. L. Ingraham 的新著《非线性动力学(混沌理论)概要》<sup>[1]</sup>一书是其中颇有特色的一种.

该书共分 8 章.第一章是非线性、混沌等基本概念的粗略描述.第二章给出了连续动力系统的基础知识,包括流、稳定性、同宿轨道、分叉、吸引子等.第三章讨论了离散动力系统,着重结合 Logistic 映射引入倍周期分叉、切分叉、Lyapunov 指数等概念,并以 Poincar'e 映射建立离散和连续动力系统的联系.第四章是关于可积和不可积的 Hamilton 系统,该章陈述了 KAM 定理和 Poincar'e-Birkhoff 定理.第五章介绍了初值敏感性(最大 Lyapunov 指数)、功率谱、算法复杂性、Kolmogorov 熵等概念,更细致地刻划了混沌的性质.第六章以伊辛格为例,介绍了重整化群及其在倍分叉、切分叉和渗流串中的应用.第七章概述了偏微分方程描述的无穷维动力系统,侧重于介绍 Rayleigh 问题和 Galerkin 方法.第八章简述非线性动力学的实验方法.

该书有如下几个突出的特点:其一是内容较全面,对数学基础、物理意义和实验方法都有涉及,基本上展

现了混沌动力学的全貌;其二是起点较低,作者尽量避免正式的数学论证,因而大致只需要线性代数和常微分方程的基础知识即可读懂;其三是叙述准确,定义都经过仔细推敲,定理都有完整叙述;其四是篇幅小,全书仅百余页,若再略去相对较专门的后三章,仅用 60 余页便给出非线性动力学的基础知识.当然,该书只是一种概括介绍,并不能代替更专门的中文入门书,如展现广阔物理视野的文献[2],侧重严谨数学基础的文献[3]和强调实验方法的文献[4]等.但该书可以提供混沌动力学的鸟瞰式全景,很有助于初学者的直观把握.

该书作者的主旨就是介绍非线性动力学的主要结果,以便读者在各自的专门研究领域中发现相应的新观念和新的可能性.我们认为该书基本上达到了这个目的.该书不仅可供不了解混沌理论的理工科高年级大学生、研究生和其他专业的研究人员学习,也可供有志于介绍和普及混沌理论知识的专家学者参考.

## 参 考 文 献

- [1] R. L. Ingraham, *A Survey of Nonlinear Dynamics (Chaos Theory)*, World Scientific, (1992).
- [2] E. A. Jackson, *Perspectives of Nonlinear Dynamics*, Vol. 1, I, Cambridge Univ. Press, (1990).
- [3] S. Wiggins, *Introduction to Applied Nonlinear Dynamical Systems and Chaos*, Springer-Verlag, (1990).
- [4] F. C. Moon, *Chaotic and Fractal Dynamics*, Wiley, (1992).

(鞍山钢铁学院 陈立群)