

小动物 PET 成像用 LYSO 闪烁晶体阵列研究

尹红,徐扬,李德辉,王佳,龙勇,胡吉海,付昌禄,蒋春健

(中国电子科技集团公司第26研究所,重庆400060)

摘要:小动物正电子发射断层技术(PET)成像较人体PET成像,对空间分辨率和灵敏度提出了更高的要求,进而促进了小动物PET用闪烁阵列制备工艺的发展。硅酸钆铈(LYSO)晶体具有高密度,高有效原子系数,响应时间短等优点,是一种极具发展潜力的新型闪烁晶体材料。该文提出一种以LYSO闪烁晶体阵列的制作方法,采用提拉法实现大尺寸闪烁晶体LYSO的生长;运用化学机械抛光法对切割后晶条进行全局平坦化抛光处理;利用自制高精度夹具组装单根晶条至阵列形式,最终制作成可应用于小动物PET的LYSO闪烁晶体阵列。

关键词:小动物正电子发射断层技术(PET);硅酸钆铈(LYSO)闪烁晶体;化学机械抛光;晶体阵列加工

中图分类号:TN804

文献标识码:A

Study on LYSO Scintillation Crystal Array for Small Animal PET Applications

YIN Hong, XU Yang, LI Dehui, WANG Jia, LONG Yong,

HU Jihai, FU Changlu, JIANG Chunjian

(26th Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Chongqing 400060, China)

Abstract: Comparing with human body PET imaging, the small animal PET imaging requires higher spatial resolution and sensitivity, thus it has promoted the development of scintillation array preparation process. LYSO crystal is considered to be the best scintillator nowadays with most comprehensive properties, including rapid responding time, high density and effective atomic number etc. This paper proposes a production process of LYSO scintillator array which can achieve large-size LYSO scintillation crystal growth using Czochralski method and polish the crystal pieces by utilizing chemical mechanical polishing method. Ultimately the LYSO scintillator array for small animal PET applications can be manufactured by using the homemade fixture with high precision.

Key words: small animal PET; LYSO scintillation crystal; chemical mechanical polishing; crystal array finishing

0 引言

正电子发射断层技术^[1-4](PET)仪是当前医学界公认最先进的大型医疗诊断成像设备之一,它能够生成生物活体代谢功能影像,并在分子水平定量探测生理变化过程。作为PET的延伸,小动物正电子断层成像仪(MicroPET)具有灵敏度高,成本低,可功能成像,可定量测量等优点。目前,小动物PET在基因表达、脑功能成像、肿瘤增殖以及新药物的前期临床诊断得到了广泛应用,它的出现为“活体”小动物实验提供了一种崭新的方法。由于用于小动物活体体重与人相比低约3个数量级(通常以成人70 kg和老鼠30 g作比较),人体PET所用的光电探测模块受灵敏度和分辨率的影响,无法满足小动物成像指标要求。所以小动物PET的空间分辨率和灵敏度方面具备更高的性能要求,进而对其探测模块的核心组件——闪烁晶体阵列提出了更高

要求。

在这种背景下,基于硅酸钆铈(LYSO)闪烁晶体阵列的小动物PET机脱颖而出,LYSO晶体具有高密度,高有效原子系数,发光时间短等优点。与常用的闪烁晶体材料BGO相比,LYSO晶体的光输出是BGO的4倍左右,衰减时间比BGO短,使得器件的时间、空间分辨率都有很大提升。同时,LYSO晶体密度较大,有利于探测器小型化,是用于小动物PET的绝佳材料。本文将采用提拉法实现大尺寸闪烁晶体LYSO的生长;运用化学机械抛光法对切割后晶条进行全局平坦化抛光处理;利用自制高精度夹具组装单根晶条至阵列形式,最终制作成可应用于小动物PET的LYSO闪烁晶体阵列。

1 小动物PET用无机闪烁晶体

1.1 无机闪烁晶体材料

无机闪烁晶体的密度大,原子量大,具有较短的

收稿日期:2014-01-23

作者简介:尹红(1968-),女,湖南人,工程师,主要从事晶体光学检测的研究。

衰变时间,是目前 PET 机与小动物 PET 的主要应用的探测器材料,表 1 为常见无机闪烁晶体主要参数指标。传统的无机闪烁材料 NaI、BGO 等难以在探测效率和相应时间两方面兼顾,不能满足目前新

型探测器的动态响应指标,难以达到小动物 PET 在时间分辨率要求。在这种前提下,LYSO、LSO、GSO 等具备高光输出量,快速响应时间的新型晶体进入了我们的视野。

表 1 主要闪烁晶体性能参数

属 性	常见无机闪烁晶体				
	NaI(Tl)	BGO	GSO	LSO	LYSO
峰值波长/nm	410	480	440	420	420
能量分辨率	6.6	10.2	8.5	10.0	12.5
光产额/(photons/MeV)	41 000	9 000	8 000	3 100	32 000
密度/(g/cm ³)	3.67	7.13	6.71	7.40	7.10
有效原子序数/(Z)	50.6	74.2	58.6	65.5	34.2
衰减长度/(1/ μ)	2.88	1.05	1.43	1.16	2.58
衰变常数/ns	230	3 000	60	40	41
折射率	1.85	2.15	1.85	1.82	1.81

1.2 LYSO 无机闪烁晶体

LYSO 晶体具有高密度,高有效原子系数,发光时间短等优点,是当今性能最优异的新型闪烁晶体材料。目前,以 LYSO 晶体阵列为核心元器件的 PET 机与小动物 PET,在市场中占据了重要地位。中国电子科技集团公司第 26 所(以下简称 26 所)采用提拉法(Cz)生长出大尺寸 LYSO 晶体(见图 1),使用中频感应加热,钛金坩埚盛料兼作发热体,纯氮气作为保护气氛,生长晶体尺寸达到 $\varnothing 60 \text{ mm} \times 280 \text{ mm}$ ^[5]。

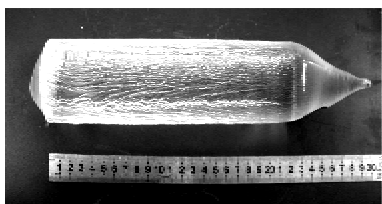


图 1 LYSO 晶体产品

晶体透过率与光输出指标与国外公司产品相近,在晶体整体性能上达到了国际一流水准。图 2 为 26 所 LYSO 晶体与国外知名厂商光透过率性能对比示意图。

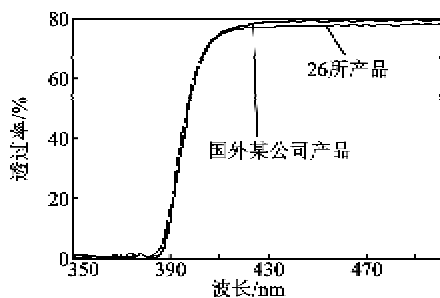


图 2 LYSO 晶体的透过率曲线

2 LYSO 闪烁晶体阵列制作

2.1 LYSO 晶条单元加工^[6]

为了保证光子在阵列晶条单元中的良好传输,并减少不必要的内部光损耗,需对 LYSO 晶条单元的端头进行抛光处理,部分小动物 PET 制造商要求晶条单元六面抛光。LYSO 闪烁晶体阵列中晶条单元的加工过程由切割、研磨、抛光 3 部分构成。

1) 切割:使用多线切割机或内圆切割机将 LYSO 晶棒切割成需要的晶条形状,并为其后的研磨抛光工艺留出足够的加工余量。

2) 研磨:经多次试验验证,选用碳化硅磨料和白刚玉对 LYSO 晶条进行粗磨和细磨,保证加工效率较高的同时获得理想形状精度。

3) 抛光:采用双轴透镜研磨机设备,首先用微米级白刚玉抛光液和合成纤维抛光布对晶体进行粗抛,改善研磨后较为粗糙的 LYSO 表面形貌。然后采用纳米级二氧化硅胶体抛光液、尼龙抛光垫对晶条进行化学机械抛光。

经化学机械抛光后,LYSO 晶体表面微观缺陷明显减少,表面粗糙度指标达到小动物 PET 要求单像素点尺寸公差 $\pm 0.05 \text{ mm}$ 。图 3 为化学机械抛光后的 LYSO 晶条。

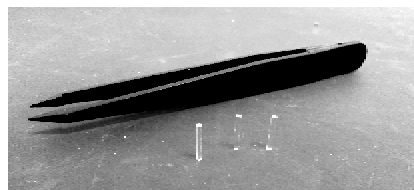


图 3 化学机械抛光后的 LYSO 晶条

2.2 LYSO 晶条单元发光性能测试

目前生产小动物 PET 设备的厂商,对其应用的闪烁晶体阵列发光性能有两个基本要求:每个阵列中不能有不发光的单元;同一个阵列中根与根之间的光产额 $\leq 5\%$ 。而通常利用提拉法所生长的 LYSO 晶体,不同晶棒的发光性能通常在标准值上下 20% 范围内波动。同时,由于 LYSO 晶体生长的自身特点,其掺杂的 Ce^{3+} 分凝系数较低,造成了晶体中 Ce^{3+} 掺杂浓度不均匀,导致晶棒在头尾部分闪烁性能有一定差异。因此为了满足市场对阵列发光性能均一性的要求,就需要我们对阵列中的每一根晶条单元进行测试,并按照等级分类。检测时所应用的测试设备为中国科学院高能物理研究所开发研制的晶体阵列测试仪,如图 4 所示。首先将避光一定时间后的 LYSO 小晶条插入专用的测试夹具中,与放射源 Cs-137 一同放置在测试仪器的光窗上,避光后加工作电源测试。



图 4 晶体阵列测试仪

我们根据测试结果,将发光性能在 5% 内的晶条视为同一等级,并分开存放。为保证阵列光输出的均匀一致性,每个阵列只能选用相同光输出级别的晶条进行组装,如图 5 所示。

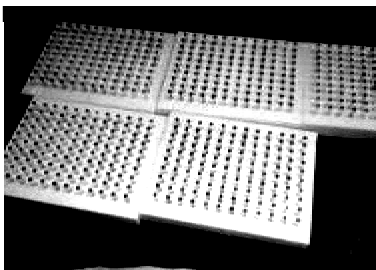


图 5 按照发光性能分级的 LYSO 晶条

2.3 LYSO 晶体阵列组装

阵列组装是小动物 PET 用闪烁晶体阵列制作的核心技术。闪烁晶体阵列内部单元的分布均匀性,二维面上 X/Y 方向对齐的一致性,对探测器模块耦合质量及探测器的探测效率有直接影响。目前

市场上大部分商用小动物 PET 的分辨率都在 2 mm 以下,限制了闪烁晶体阵列中的晶条单元尺寸,这对阵列的制作提出了更高的要求。针对阵列制作过程中存在的以上问题,采用高精度阵列组装夹具并选用 ESR 反射膜作为晶条单元间反射材料,成功的制作出满足探测器效率要求的 LYSO 闪烁晶体阵列。

图 6 为自行设计的高精度闪烁阵列组装夹具,此夹具采用由 2 个凹形推挡组件和 L 型推挡组件构成的方形框架来挤压晶体阵列,将单根晶体单元组装成分布均匀、一致性良好的晶体阵列。同时选用厚度 $(65 \pm 8) \mu\text{m}$ 的 ESR 反射膜(反射率 $\geq 98\%$)作为阵列单元间填充材料,在保证单元分布均匀的同时兼顾了光子在晶体单元的传递效率。图 7 为某型号小动物 PET 用 LYSO 晶体阵列产品。

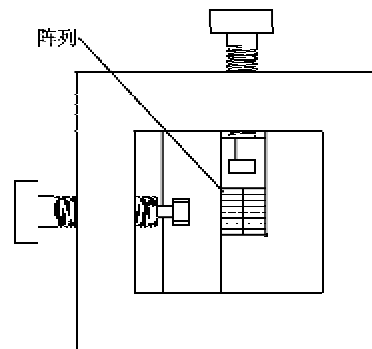


图 6 LYSO 晶体阵列制作夹具示意图

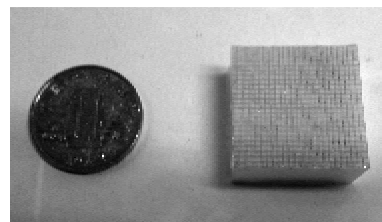


图 7 LYSO 闪烁晶体阵列

3 结束语

随着生物医学领域科学技术的不断发展,越来越多的研究依赖动物成像手段完成,这加大了市场对小动物 PET 的市场需求。通过提拉法生长高性能的 LYSO 闪烁晶体,化学机械抛光法完成对晶条单元的表面加工,利用高精度组装夹具完成阵列单元的组装,在提高组装效率的同时,保证了晶体排列的均匀性与晶体对齐的一致性,最大程度避免了由于阵列组装较差而引起的探测器效率问题。LYSO 晶体闪烁阵列制作工艺的不断改进,对小动物 PET 的发展有着重要的意义。

(下转第 411 页)