

晶体光输出非均匀性的测量和研究^{*}

邵明¹⁾ 许彤 刘明昶 王从容 阮丽娟 陈宏芳

(中国科学技术大学近代物理系高能物理联合研究所 合肥 230026)

潘晓蕙 王从周

(合肥工业大学机械与汽车工程学院 合肥 230009)

摘要 利用²²Na 放射源和符合测量方法实现了对钨酸铅晶体的光输出纵向非均匀性的精细测量. 研究了改变晶体表面粗糙度对光输出非均匀性的影响.

关键词 钨酸铅晶体 闪烁晶体 非均匀性 ²²Na 放射源 表面粗糙度

1 引言

晶体电磁量能器(ECAL)的能量分辨率不仅和晶体的品质有关,同时还依赖于晶体的包装及其光输出非均匀性等因素. 光输出非均匀性是指沿晶体纵向不同位置激发的荧光,其光输出并不相同. 原因主要有两个,即晶体本身形状(棱台形)对光的“聚焦”作用和晶体本身对荧光的自吸收. 研究^[1]表明,晶体沿纵向光输出的均匀性对量能器的能量分辨率有很大的影响. 作为欧洲正在建造的 CMS 探测器的关键部分——基于钨酸铅(PWO)闪烁晶体的电磁量能器,为了将晶体光输出非均匀性对能量分辨率的贡献控制在 0.3% 以下,要求在电磁簇射最大处附近(晶体中约 5—10 辐射长度(X_0)处),非均匀性小于 0.35%/ X_0 .

一般说来,晶体的光输出非均匀性可以通过对晶体表面进行适当的处理得到改善. 为了仔细研究表面处理对晶体光输出的影响,建立一套精细的测量系统是必要的. 本文采用²²Na 放射源符合测量的方法对一批 PWO 晶体的光输出非均匀性作了精确的测量,在此基础上研究了通过打磨改变晶体表面粗糙度对非均匀性的影响. 并和蒙特卡罗模拟得到的结果进行比较.

2 实验装置

测量光输出的非均匀性,也就是要沿着晶体长轴方向测量光输出随激发源位置的变

2000-06-26 收稿

^{*} 国家自然科学基金资助(19975044, 59932002)

1) E-mail: swing@mail.ustc.edu.cn

化. 由于 ^{60}Co 以及 ^{137}Cs 源精确准直会带入较大的散射本底, 但是不准直会使激发的晶体范围太大, 而无法实现精细的测量^[2], 有人采用质子束^[3]和宇宙线^[4]来实现非均匀性的测量. 这些方法过于复杂, 我们采用 ^{22}Na 放射源, 利用其正电子湮没产生的一对背靠背的 0.511MeV 的 γ 光子做符合测量, 该方法的突出优点是通过物理符合准直能够极大地压低 γ 光子的散射本底使得光输出的测量更加精确. 图 1 为非均匀性测量的实验装置图.

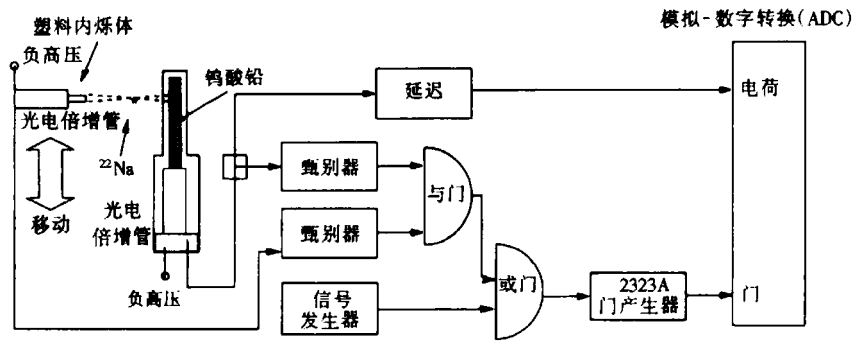


图 1 非均匀性测量的实验装置图

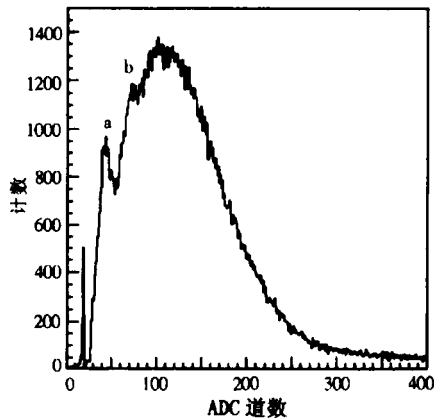


图 2 符合的 0.511MeV γ 光子在 PWO 晶体中产生的典型的谱形

(可以看见单光电子峰 a 和双光电子峰 b)

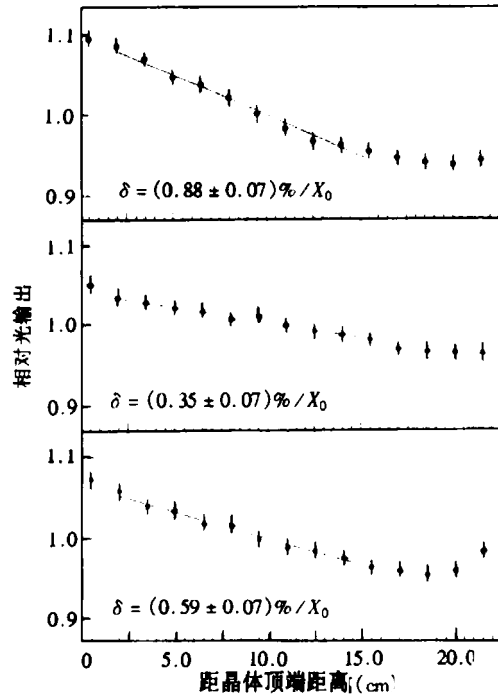
为了能够沿着 PWO 晶体长轴方向精细地测量光输出的变化, 就要求符合事例对 PWO 晶体的张角足够小, 我们采用厚度仅 8mm 的片状塑料闪烁体并横向放置, 一方面可以减小符合事例的张角, 另一方面水平方向较长可以提高塑料闪烁体对 γ 的吸收效率. 采用的 ^{22}Na 源为薄片包装, 出于与上面相同的目的, 该放射源也被横向放置, 并相对靠近 PWO 晶体. 几何计算可以得到符合 γ 事例对 PWO 的沿晶体长轴方向的照射范围大小约为 5mm . 我们设计了一套机械升降装置, 使得放射源和符合探测器可以同步上下移动, 这样就可以测量晶体长轴方向的光输出的非均匀性.

3 光输出非均匀性测量的实验结果

用 ^{22}Na 符合法对一批 PWO 晶体的光输出非均匀性进行了测量. 这些晶体均来自上

表1 用 ^{22}Na 符合法测量的光输出非均匀性

晶体编号	非均匀性($\%/X_0$)	
	辐照前	辐照后
S252	0.84 ± 0.07	/
S291	0.53 ± 0.06	/
S373	0.88 ± 0.07	/
S454	0.26 ± 0.07	/
S548	0.45 ± 0.06	/
S551	0.48 ± 0.06	/
S767	0.35 ± 0.07	0.29 ± 0.07
702	0.34 ± 0.07	0.44 ± 0.07
695	0.59 ± 0.07	0.69 ± 0.07

图3 ^{22}Na 符合法测量的PWO晶体光输出非均匀性曲线

海硅酸盐研究所(SIC),测量结果列在表1中.其中的非均匀性数值是对前端开始1—15cm范围内的测量值(已归一化)用直线拟合其斜率(取绝对值)得到的.非均匀性 δ 的单位是 $\%/X_0$.

表中有三块晶体做了辐照前后的对比,辐照剂量率为1Gy/h,总剂量为125Gy.结果表明在误差范围内,光输出非均匀性辐照前后没有变化.图3显示了几块晶体的光输出非均匀性曲线,可见基本上晶体都是在从前端开始15cm范围内成直线下降,但后端8cm的行为则不尽相同.

4 光输出非均匀性的改善

4.1 Monte Carlo 模拟

从表1可以看出,大部分晶体的光输出非均匀性都没有达到CMS-ECAL的要求.为此,利用蒙特卡罗(Monte Carlo)方法^[7]研究了通过改变晶体包装和表面情况以改善其非均匀性的可能性.

对晶体包装的模拟主要是改变包装材料的光反射特性和吸收效率,研究其对晶体的光输出非均匀的影响性.模拟发现,即使在晶体包装全漫反射或全吸收的极端情况下,晶体非均匀性基本上不变.这主要是因为PWO晶体高的折射率(相应的全反射角只有约

30°)和晶体本身近似矩形的外形共同影响的结果。

我们对改变晶体表面情况的模拟主要是增加其中一个侧面的表面粗糙度来研究其对光输出非均匀性的影响。在模拟过程中,晶体某一侧面的法线方向将在一定角度范围内被随机化。随机角度范围越大,相当于晶体表面粗糙度越高。图 4 给出了随机角度范围为 40°时的晶体光输出非均匀性曲线,表面状况未改变时的结果也放在一起作为对比。

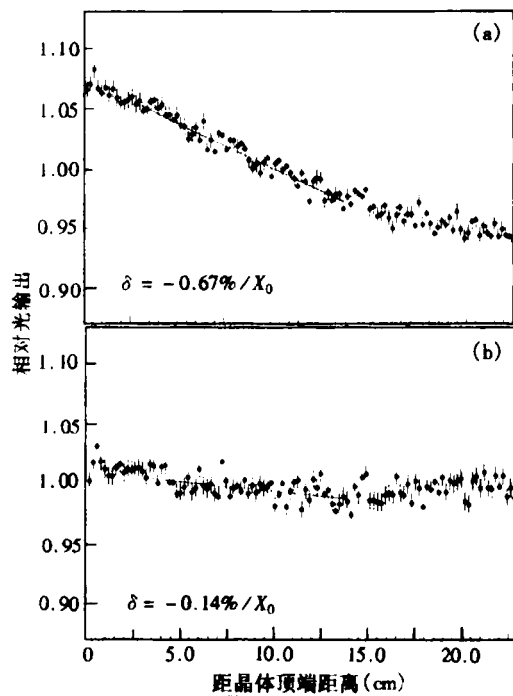


图 4 改变晶体表面粗糙度对光输出非均匀性影响的模拟结果

(a) 未改变侧表面粗糙度;
(b) 改变侧表面粗糙度后。

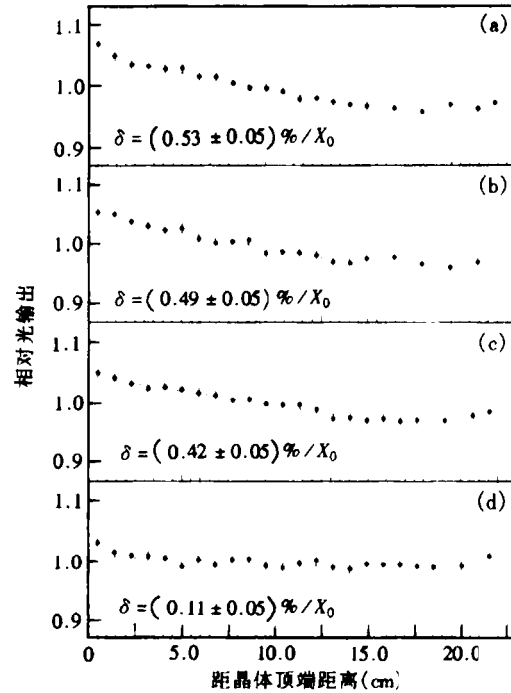


图 5 晶体 S291 光输出非均匀性曲线随表面粗糙度的变化

由(a)~(d)粗糙度依次为打磨前: $R_s < 0.05 \mu\text{m}$,
第一次打磨: $R_s = (0.08 \pm 0.02) \mu\text{m}$,
第二次打磨: $R_s = (0.20 \pm 0.05) \mu\text{m}$
和第三次打磨: $R_s = (1.49 \pm 0.27) \mu\text{m}$.

4.2 实验结果

根据蒙特卡罗模拟的结果,我们决定通过提高晶体表面粗糙度来达到改善其非均匀性的目的。

由于缺乏相应的晶体打磨机械,使用了金相砂纸来进行手工打磨。选用晶体 S291 作为实验样品,用多种不同型号的金相砂纸对它的一个侧面进行打磨处理。砂纸的粒度由小到大逐渐变化,相应的表面粗糙度也逐渐增加,对应不同的砂纸粒度,我们分别用干涉显微镜 6JA 和双管光楔法干涉显微镜 9J 测量了晶体的表面粗糙度,并测得相应的光输出非均匀性曲线,然后由此决定最合适的打磨程度。图 5 给出了 S291 晶体在不同表面粗糙度时的非均匀性曲线。在未对侧面打磨前,晶体各表面粗糙度为 $R_s < 0.05 \mu\text{m}$,打磨后,其中一个侧面的粗糙度增加,依次为 $R_s = (0.08 \pm 0.02) \mu\text{m}$, $R_s = (0.20 \pm 0.05) \mu\text{m}$ 和

$R_z = (1.49 \pm 0.27) \mu\text{m}$, 其他各面粗糙度不变.

由图5可以看出,随着侧表面粗糙度增加,晶体的光输出非均匀性逐步得到改善,当粗糙度增至 $R_z = (1.49 \pm 0.27) \mu\text{m}$ 时,非均匀性已经达到 CMS-ECAL 的要求.

根据晶体 S291 的实验结果,对其它几块 PWO 晶体同样进行了侧面打磨处理.不同之处在于这些样品的表面粗糙度一次打磨至 $R_z = (1.49 \pm 0.27) \mu\text{m}$. 它们的光输出非均匀性测量结果如表2所示.

表2 PWO 晶体打磨前后的光输出非均匀性

晶体编号	光输出非均匀性(%/X ₀)	
	打磨前	打磨后
S291	0.53 ± 0.06	0.11 ± 0.05
767	0.35 ± 0.07	0.00 ± 0.05
S695	0.59 ± 0.07	0.12 ± 0.05

5 结论

本文实现了钨酸铅晶体的光输出非均匀性的精细测量,采用²²Na符合测量方法结合卷积拟合的数据处理方法,晶体纵向光输出非均匀性测量的步长可以小到5mm. 实验表明表面抛光的晶体光输出均匀性比较差,在前端15cm范围内光输出非均匀性曲线呈现下降趋势,下降的斜率超过了CMS电磁量能器对晶体的要求. 晶体光输出过程的模拟以及实验结果都表明,当对晶体的一个侧面作打磨处理时,随着打磨的粗糙程度增加,非均匀性曲线的下降趋势逐渐变缓. 当粗糙度达到一个合适的值时($R_z = (1.49 \pm 0.27) \mu\text{m}$),光输出均匀性曲线已经足够平缓,并达到了CMS电磁量能器的要求.

参考文献(References)

- 1 The CMS Electromagnetic Calorimeter Project Technical Design Report. CERN/LHCC 97-33, 1997, 304-305
- 2 Auffray E, Cavallari F, Davies G J et al. CMS Internal Note CMS, 2000, 014
- 3 Hillemanns H, Kirm T, Schwenke J et al. CMS NOTE, 1998, 005
- 4 Depass P, Ermenwein J P, Ille B et al. CMS NOTE, 1998, 068
- 5 WU J, XU T, LI Ch et al. Nucl. Instr. and Meth., 1998, A419:154-159
- 6 XU Tong, SHAO Ming, LI Cheng et al. Accepted by Nuclear Instrument and Method, Section A, 2000
- 7 SHAO Ming, LIU Heng-Wen, ZHANG Zi-Ping. High Energy Phys. and Nucl. Phys., 2001, 25(1):50 (in Chinese)
(邵明,刘衍文,张子平等. 高能物理与核物理, 2001, 25(1):50)

Study on the Light Output Non-uniformity of PbWO₄ Crystal*

SHAO Ming¹⁾ XU Tong LIU Ming-Chang WANG Cong-Rong

RUAN Li-Juan CHEN Hong-Fang

(*Department of Modern Physics, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China*)

PAN Xiao-Hui WANG Cong-Zhou

(*College of Mechanical and Auto Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China*)

Abstract This paper presents the measurement on the light output non-uniformity of full size PbWO₄ crystal, which will be used in the electromagnetic calorimeter (ECAL) of CMS detector. It makes use of the ²²Na radioactive source and the coincident method. With the help of convolution fitting method, it is possible to make fine measurement on the light output non-uniformity of the crystal. The effect of depolishing one of the lateral faces of the crystal on the non-uniformity has been studied. The slope of the non-uniformity curve decreases with the increasing of the roughness. When the roughness reaches $R_r = (1.49 \pm 0.27) \mu\text{m}$ the non-uniformity curve meets the requirement of CMS-ECAL.

Key words lead-tungstate crystal, scintillator, non-uniformity, ²²Na source, surface roughness

Received 26 June 2000

* Supported by National Natural Science Foundation of China (19975044, 59932002)

1) E-mail: swing@mail.ustc.edu.cn