

## 钨酸铅晶体抗辐射性能的测试\*

邵明 陈宏芳 李澄 陈辉 许咨宗 汪兆民

(中国科学技术大学近代物理系 合肥 230027)

**摘要** 大型强子对撞机(LHC)运行时具有很高的辐射背景,为达到所要求的电磁量能器的测量精度对研制中的钨酸铅晶体的抗辐照性能提出了很高的要求. 本文主要介绍了用 $^{60}\text{Co}$ 的 $\gamma$ 射线,在相应的辐照剂量率辐照下,对几种全尺寸(23cm长)钨酸铅晶体抗辐照性能的评估和测量方法. 研究了晶体在侧面辐照条件下对光产额及纵向发光均匀性的影响,给出了对几种晶体的测量结果.

**关键词** 钨酸铅晶体 电磁量能器 抗辐射能力

### 1 引言

晶体电磁量能器(ECAL)是欧洲粒子物理研究中心(CERN)正在建设的大型强子对撞机(LHC)的实验探测装置 CMS(Compact Muon Solenoid)的核心部分. 由于钨酸铅晶体(PWO)具有高密度、快衰减时间、适当的光产额(Light Yield)、较强的抗辐照能力以及成本低廉等特点,CMS将其作为 ECAL 的首选晶体. 此电磁量能器将由 80000 多块钨酸铅晶体组成. 为了达到实验的物理目标,要求 ECAL 对高能粒子的能量分辨率为 0.5%,这就要求晶体的光学性能在辐照环境下具有非常好的稳定性:由辐照引起的光产额损失率小于 5%,并且光产额均匀性变化小于 1%.

LHC 运行时,由于 pp 碰撞的高事例率及事例的高多重性,大部分内探测器都要承受前所未有的高辐射剂量. LHC 的  $\gamma$  光子流主要是由 pp 相互作用产生的大量  $\pi$  介子引起的. 中性  $\pi$  介子的衰变,产生能量在几百 MeV 的光子. 另外,由稀有衰变,核的退激发、韧致辐射以及活化等产生能量在 100KeV—1MeV 的光子. LHC 运行在最高设计亮度  $10^{34}\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  时,对辐照环境的模拟计算给出电磁辐射在电磁量能器桶部及端盖的剂量率,在桶部中心处的剂量率为 0.15Gy/h,桶部和端盖交界处的剂量率为 0.29Gy/h,而在前向  $\eta=3(\theta\approx 5.7^\circ)$  处的剂量率为 15Gy/h<sup>[1]</sup>.

大量的实验结果表明<sup>[2,3]</sup>,PWO 晶体经  $\gamma$  射线辐照后,其荧光发射光谱及衰减时间都基本没有变化,也就是说,晶体的发光机制没有受到损害. 但由于辐射在其内部会形成一

1999-04-22 收稿

\* 中国科学院国际合作局资助

些色心而引起对光的吸收,晶体的透明度变差,而使闪烁光的产额有所减少,因而会影响量能器的能量响应特性和工作性能. 研究辐照引起的晶体性能变化及损伤机制,从而为改善晶体的性能提供依据是研制高精度 ECAL 的一个重要课题<sup>[4]</sup>.

## 2 辐射损伤测量装置及方法

为了测试晶体对电磁辐射的抗辐照能力,使用一个 2.6Ci 的<sup>60</sup>Co 源. 剂量率随与放射源之间距离的变化如图 1 所示. 待测晶体放在要求的剂量率(100rad/h 以下)的位置上. 整个辐照源及测量系统处在空调室内,在辐照和测量过程中房间的温度变化保持在 $\pm 1^\circ\text{C}$ 之内. 晶体垂直地安装在光电倍增管(PHILIPS XP2262B)上,密闭在一个直径为 40mm 厚 1mm 的黑色薄纸壳内. 光电倍增管放在一个圆柱形的铅屏蔽桶内,以保护光电管不受到 $\gamma$ 辐照的损伤. 光电倍增管的工作增益在 $3 \times 10^7$ 左右. 光电倍增管的高压电源是 C. A. E. N Module 471,电压监测稳定度为 0.05%. 辐照时 $\gamma$ 光子由侧面射入晶体,对全尺寸( $22^2 \times 25^2 \times 230\text{mm}$ )的晶体,最大可使 $\frac{4}{5}$ 长度的晶体受到辐照. 在晶体的顶端可放一个  $100\mu\text{Ci}$  的<sup>60</sup>Co 源,用来测量晶体的光产额. 光电倍增管的输出信号由 QVT (LeCroy 3001)多道分析仪来测量,并通过 Lecroy 3031 接口和 PC 机联接,在线记录 QVT 输出的谱形.

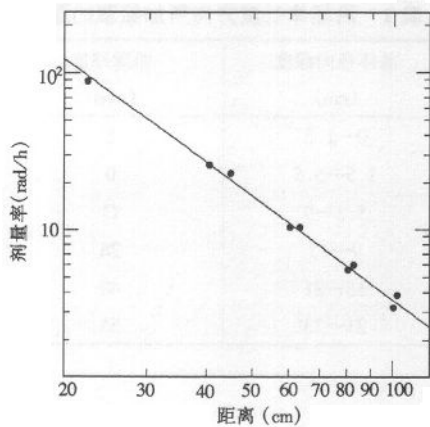


图 1 辐照室的剂量率分布

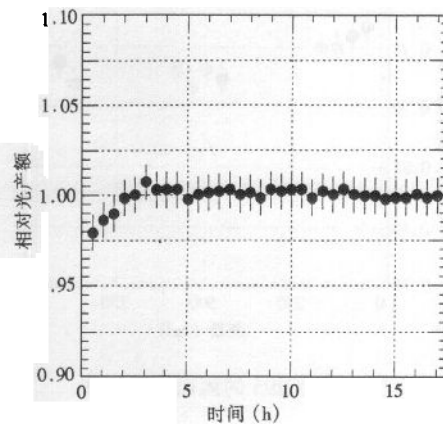


图 2 晶体光产额稳定性的测量

由于 PWO 晶体的光产额随温度的变化较大,其温度系数在室温附近为 $-1.98\%/^\circ\text{C}$ <sup>[5]</sup>,晶体由外面进入测试室需要一定的时间使它的温度达到平衡,因此一般监测 4 小时以上,以确认系统的温度及晶体和光电管之间的光学耦合已达到稳定. 测量时,晶体避光壳外放有半导体温度计,实时记录温度,以便对光产额作温度修正. 考虑到钨酸铅晶体的光产额相对较小,一般在 10pe/MeV 左右,为能得到稳定的测量值,对实验测量的脉冲幅度谱需仔细进行数据处理和拟合<sup>[6,7]</sup>. 在我们的实验条件下,测量的稳定性可达到 1%,如图 2 所示.

在系统达到稳定之后开始进行辐照. 每辐照一段时间(一般几小时), 测量一次光产额, 每次测量过程约需 30 分钟. 以辐照后光产额的变化来度量辐照损伤. 经过长时间辐照后, 晶体的辐照损伤趋于饱和. 在确定达到饱和后, 辐照停止, 然后连续测量光产额, 以观察晶体损伤的恢复特性.

### 3 测试结果

用上述方法对上海硅酸盐所(SIC)及俄罗斯 BTCP(Bogoroditsk Technochemical Plant)研制的 PWO 晶体进行了测量.

#### 3.1 辐照损伤

在设定的剂量率下, 辐照晶体的一部分, 以观察其损伤情况. 图 3 给出掺杂钨酸铅晶体 SIC295 在剂量率 20rad/h 下侧面辐照  $\frac{4}{5}$  晶体长度时光产额随辐照剂量的变化, 其辐照损伤为 7%. 对不掺杂的钨酸铅晶体 SIC-J3, 分别辐照 7cm, 14cm, 21cm 长度时的光产额损失为 12.1%, 16.9%, 20.5%.

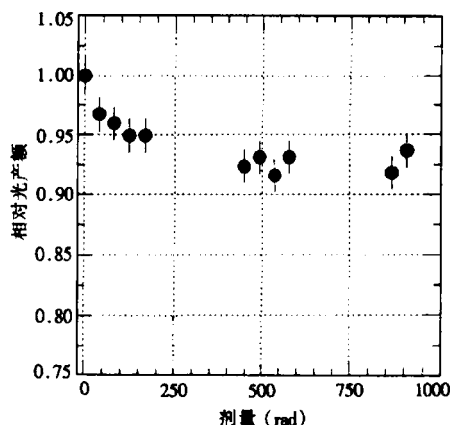


图 3 SIC295 的侧面辐照损伤

表 1 沿晶体长度方向所加铅罩的厚度

晶体径向深度 (cm)	铅罩厚度 (mm)
0—1.5	8
1.5—5.5	0
5.5—9	11
9—15	28
15—21	48
21—23	55

辐照损伤测量时, 常见的辐照方式有前向辐照和侧面辐照两种, 图 4(a), (b) 中的曲线分别显示了晶体在不同辐照方式下所受的剂量率沿长度方向的分布. 而由几百 MeV 的光子在晶体内电磁簇射沿晶体纵向的发展, 可以计算出剂量率沿 PWO 晶体长度方向上的分布形状<sup>[1]</sup> 如图 4(a) 所示, 其最大剂量率的分布范围约为 4cm. 容易看出, 由前向辐照方式测得的光产额损失将比实际情况小, 而侧面辐照方式则给出偏大的损伤估计值. 为了得到晶体更接近实际情况的抗辐照能力, 用加不同厚度铅罩的侧面辐照方法来模拟这种辐照场. 铅罩厚度随晶体长度方向的变化由表 1 给出. 以 1.25MeV 的  $\gamma$  射线在 Pb 中的吸收长度为 2.4cm 计算, 其剂量率分布如图 4(b) 所示. 图 5 给出在 20rad/h 的辐照场下 SIC278 晶体有和没有铅屏蔽时的辐照损伤分别为 9% 和 12.5%. 同样地, 对另一块

晶体 R2151 的测量给出, 有和没有铅屏蔽时的辐照损伤分别为 12% 和 16%. 可见由  $^{60}\text{Co}$  源侧向照射  $\frac{4}{5}$  长度的晶体所测得的辐照损伤比加铅罩时测得的损伤要大约 1.3—1.5 倍.

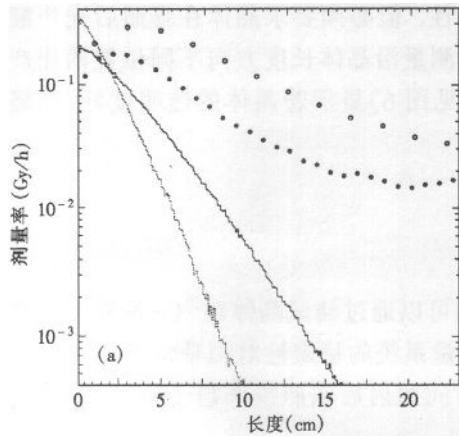


图 4 (a) LHC 的 ECAL 桶部晶体沿长度方向的剂量率分布

●, ○ 分别表示  $\eta=0$  和  $\eta=1.4$  处的剂量率分布. 图中同时给出了  $^{60}\text{Co}$  源 (实线) 和  $^{137}\text{Cs}$  源 (虚线) 前向辐照时的剂量率分布.

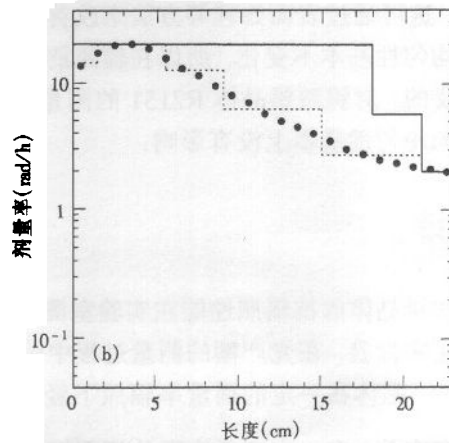


图 4 (b)  $^{60}\text{Co}$  源侧向辐照时, 加铅屏蔽 (实线) 和不加铅屏蔽 (虚线) 的剂量率分布

● 表示 LHC 的 ECAL 桶部晶体沿长度方向的剂量率分布, 其最大剂量率为 20 rad/h.

### 3.2 辐照均匀性的检验

$^{60}\text{Co}$  源侧向照射是否会造成晶体远离辐照源的一侧没有受到充分的照射, 以致晶体的损伤未完全饱和呢? 为此我们在一侧照射, 在损伤达到饱和以后将晶体旋转  $180^\circ$  后继续辐照, 测量其光产额并和旋转前的测量结果进行比较. 对掺杂钨酸铅晶体 SIC294 和 SIC295 的实验结果显示在一侧辐照已足以使晶体的损伤达到饱和.

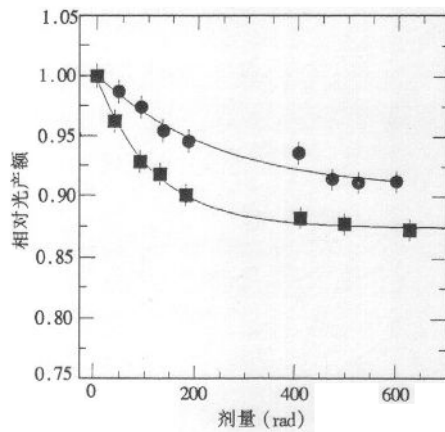


图 5 SIC278 晶体的侧面辐照损伤 ● 加铅罩, ■ 不加铅罩.

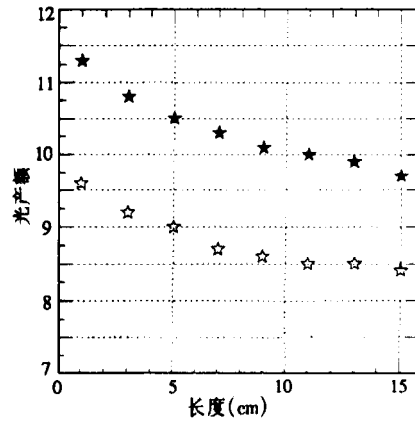


图 6 R2151 晶体辐照前后的发光均匀性 ★ 辐照前, ☆ 辐照 800rad 后 (20rad/h).

### 3.3 辐照对光产额均匀性的影响

为达到实验所要求的 ECAL 的能量分辨率,对晶体的光产额沿纵向的均匀性有一定的要求.这可通过表面处理等方法来改善其均匀性.但必须要求晶体在辐照后光产额沿纵向的均匀性基本不变化.所以在辐照前后分别测量沿晶体长度方向不同位置的光产额是很重要的.对钨酸铅晶体 R2151 的测量结果(见图 6)显示若晶体的透明度好,则辐照对发光的均匀性基本上没有影响.

## 4 小结

钨酸铅晶体的抗辐照性能在实验室测试阶段可以通过测试晶体经 $^{60}\text{Co}$ 源辐照后光产额的变化来检验.在光产额的测量过程中维持测量系统的稳定性对测量结果的精度是非常重要的.晶体在一定的剂量率辐照下经一段时间照射后辐照损伤趋于饱和,其饱和值和剂量率有关.在一定剂量率下从侧面辐照 $\frac{2}{3}$ 长度晶体来估计晶体的辐照损伤比实验条件下偏大.

为了改进钨酸铅晶体的抗辐照性能,钨酸铅晶体研制组做了大量的工作,采用特殊的晶体后处理方法及选择合适的元素掺杂来补偿晶体结构的缺陷,并取得了很大的进展<sup>[8]</sup>.由上面的实验结果,可看到通过掺杂的办法,全尺寸的晶体 SIC295 的抗辐照性能已基本达到 CMS-ECAL 的要求.

作者感谢上海硅酸盐研究所钨酸铅晶体研制组和瑞士联邦理工学院高能物理组在工作中的大力支持.

### 参考文献(References)

- 1 Huhtinen M. CMS Note, 1998, 055
- 2 ZHU R Y et al. Nucl. Instr. and Meth., 1996, A376:319
- 3 ZHU R Y et al. IEEE Trans. Nucl. Sci., 1997, Ns-44:468
- 4 Kobayashi M et al. Nucl. Instr. and Meth., 1998, A406:442
- 5 Lecoq P et al. Nucl. Instr. and Meth., 1995, A365:291
- 6 Borgia B et al. Nucl. Instr. and Meth., 1997, A325:69
- 7 WU Jian et al. Nucl. Instr. and Meth., 1998, A404:311
- 8 CHEN H F et al. Nucl. Instr. and Meth., 1998, A414:249

## Testing the Radiation Hardness of Lead Tungstate Scintillating Crystals\*

SHAO Ming CHEN HongFang LI Cheng CHEN Hui XU ZiZong WANG ZhaoMin  
(Department of Modern Physics, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

**Abstract** Large Hadron Collider operation will produce high radiation background, lead tungstate crystal is selected as scintillator of the CMS electromagnetic calorimeter. To reach the precision requirement of the energy measurement, strict requirement of the radiation hardness to PWO is needed. In this paper, we present a method for evaluating the radiation hardness and measurement results for several full size (23 cm length) lead tungstate crystals under  $\text{Co}^{60}$   $\gamma$ -ray side irradiating, investigating the light yield loss and its longitudinal uniformity.

**Key words** lead tungstate crystal, electromagnetic calorimeter, radiation hardness

---

Received 22 April 1999

\* Supported by the Bureau of International Cooperation, CAS