

# 闪烁体瓦片-光纤量能器的辐照损伤研究

毛慧顺 王国良 刘念宗 张戈 张竹湘 张良生 张彩娣 郑林生  
周永参 胡力东 赵小健 钟学初 谈益平 韩世温

(中国科学院高能物理研究所, 北京 100039)

D. GREEN A. PARA

(美国 Fermi 加速器实验室)

K. JOHNSON

(美国 Florida 州立大学)

## 摘 要

本文描述了对 SDC 闪烁体瓦片-光纤量能器模型的辐照损伤研究。四个模型用北京正负电子对撞机的 1.1GeV 电子束累积辐照了 6Mrad。测量了在模型的不同深度和不同累积剂量时的光输出,研究了辐照后模型的恢复过程以及辐照损伤对环境气体的依赖。

## 一、引 言

螺线管探测器 (SDC) 是至今唯一已获得批准的,准备工作在超级超导对撞机 (SSC) 上的大型通用谱仪。SDC 重要部件之一的量能器拟采用塑料闪烁体加铅或铁吸收体构成,信号通过塑料闪烁光纤引出。SDC 的部分径迹室也打算使用塑料闪烁体。原因在于塑料闪烁体响应速度快,读出简便,最适宜超高亮度的要求,而且结构简单,建造和运行方便。但关键是塑料闪烁体能否承受住相当于  $10^{34}/\text{cm}^2 \cdot \text{s}$  的 SSC 亮度持续 10 年所产生的总累积辐照剂量。辐照损伤实验就是研究和测量闪烁体对辐照的承受能力。实验结果直接关系到 SDC 的最终方案。

SDC 辐照的来源是 SSC 的质子和质子对撞。对撞后产生的大部分粒子是  $\pi$  介子,中性  $\pi$  产生  $2\gamma$  衰变,这些  $\gamma$  光子将在量能器中产生电磁簇射。而电磁簇射的全部能量将沉积在一个有限深度的区域内,这将对量能器中的闪烁体造成严重的辐照损伤。虽然 SSC 是多 TeV 量级对撞机,但产生的光子绝大部分在几个 GeV 能区,因此北京正负电子对撞机 (BEPC) 的 1.1GeV  $e^-$  试验束是模拟 SSC 电磁簇射的较为理想的辐照源。四个瓦片式闪烁体量能器模型用 BEPC 试验束逐步辐照多次,直到模型各处都获得 6Mrad 累积剂量。在每一步剂量上,测量了在模型不同断面上的光输出,从中了解不同部位的损伤状况;在 6Mrad 累积剂量后,研究了它们的恢复过程;还观测了辐照期间的损伤及恢复过

程对环境气体——空气和氮气的依赖关系。

## 二、瓦片式闪烁体量能器模型

图 1 是瓦片式闪烁体量能器模型的示意图及照片。一个标准模型由 21 块铅板吸收体和 20 块瓦片式(平板型)闪烁体组成,两者相间排列。闪烁体是聚乙烯作基底的 SCSN 81 型,每块 2.5mm 厚,截面约  $11 \times 11\text{cm}^2$ ; 铅板厚 5mm, 截面  $12.7 \times 12.7\text{cm}^2$ 。每片闪烁体的光信号经具有波移特性的紧嵌在闪烁体上的光纤直接传输到光电倍增管(如 XP 2020), 一个模型共用一个光电倍增管。

光纤型号 BCF91, 核心是 1mm 直径的掺杂聚乙烯, 外表包有几  $\mu\text{m}$  厚的低衍射物质 PMMA (聚甲基丙烯酸甲酯)。光纤紧嵌入闪烁体槽时没有用胶, 光纤束与光电倍增管紧配合时也没用硅油, 以避免胶和硅油的辐照损伤。

除光电倍增管外, 铅板、闪烁体和光纤全部密封在一个铝盒中。

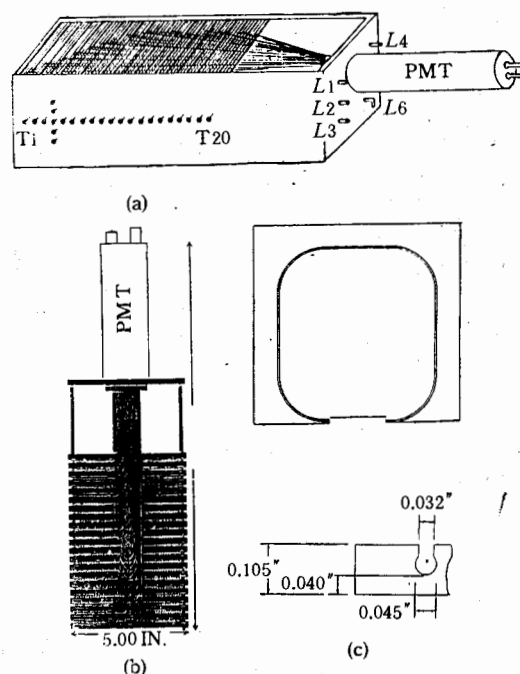


图 1 瓦片式闪烁体量能器模型

(a) 示意图; (b) 照片; (c) 典型的光纤与闪烁体的耦合方式

## 三、试验束及剂量监测

辐照源是 BEPC 的  $e^-$  试验束。典型的束流状况是: 峰值电流 600mA, 脉冲宽度 2.5ns, 频率 12.5Hz, 束斑  $1\text{cm} \times 1\text{cm}$ , 约  $1.1 \times 10^{14} e^-/\text{cm}^2 \cdot \text{s}$ , 相应平均电流密度为 18.75

nA/cm<sup>2</sup>.

在控制间,通过束流线上的三个荧光靶可监测束流的位置和束斑大小;通过微计算机对束线上一系列磁铁电流的设置,可遥控束流位置和束斑大小。每个模型的正前方也安有荧光靶以监测在模型上的辐照位置和束斑大小。

试验束线末端有一个束流电流变压器(BCT),用于辐照期间对束流的瞬时强度和累积剂量的监测。BCT输出脉冲的面积精确地正比于电子通量,即通过BCT的电子数目。把BCT脉冲送到由BCT自身作开门信号的模拟数字转换器(ADC),即可获得束流中电子数所相应的数字值。微计算机读出、记录ADC数值,并把它们转换成束流强度和辐照累积剂量。整个系统用精密脉冲发生器作过刻度,并用实际束流加以校验。由电子通量转换为以rad为单位的辐照剂量是利用关系式  $1\text{rad} = 3 \times 10^6 \text{e}^-/\text{cm}^2$ 。该式是根据模型结构和束流电子能量,计算在量能器簇射最大值处的剂量得到的。

为确保剂量值的可靠性,在模型簇射最大值处及模型前各放置了五片色谱胶片,辐照前后胶片的光谱变化将给出辐照剂量值<sup>[1]</sup>,以此校验BCT给出的剂量值。

## 四、实验装置及实验步骤

### 1. 模型排列和可移动实验车

编号#1、#2、#5和#6的四个待测模型被安置在一个可移动实验车上。

实验既可载模型与车一起运动;亦可车不动,而用微机遥控放置模型的桌面在水平方向( $x$ )和垂直方向( $z$ )上不断移动。辐照区地面上铺有专设轨道供车的进出及定位。辐照期间,载有四个模型的实验桌在 $x$ 和 $z$ 方向上不停地来回匀速运动,以保证四个模型都获得均匀的辐照。 $x$ 方向移动速度约30mm/s, $z$ 向约0.75mm/s。

### 2. 源驱动器和刻度<sup>[2]</sup>

量能器模型在辐照前后性能变化的刻度和测量,是用一个可遥控运动的放射源实现的。源为<sup>137</sup>Cs,6.8mCi,直径0.71mm、长1.1cm,制作在一根长约6m、直径0.71mm的金属细丝前端。源驱动器以遥控方式控制金属细丝的运动,从而把源经由塑料细管和金属细管推到模型的各个待测部分。

每个模型有24个横向金属细管(T1、T2...T20及T4处上下各2个),起始于模型侧面,横穿于每块闪烁体前;还有6个纵向细管(L1、L2...L6),起始于模型后方,跨越整个20块闪烁体-铅夹层(图1)。

在辐照前及若干剂量辐照后,源驱动器通过有关细管把源快速推入模型的待测断面,然后控制金属细丝作慢速匀速运动拉出模型,测量此时的光输出,即可了解模型有关断面的损伤状况。

### 3. 气体环境

为研究气体对辐照损伤和恢复过程的影响,模型#1始终保持在氮气中;#5和#6一直在空气中;#2在累积剂量达6Mrad前置于氮气中,测完6Mrad数据后切断氮气,使其

在空气中恢复。

#### 4. 辐照及数据获取

辐照分若干步进行,各步剂量分别为 0.3、0.45、0.375、0.375Mrad, 然后以 0.75Mrad 为一步, 直到 6Mrad 累积剂量。模型 #1, #2 和 #5 是从 0 达 6Mrad, 但 #6 是在已经受 7.5Mrad 辐照的基础上这次又辐照 6Mrad。

每步辐照后都测量放射源扫过模型有关断面时光电倍增管的输出电流。该电流经电阻转换成电压值。计算机经 CAMAC 系统从自动扫描数字电压插件 (DSP2032) 定时读出并记录该电压值。只要放射源在匀速运动, 这些定时记录的数据就相应模型的某确定空间位置上的光输出。

光电倍增管的本底电流, 即源置于屏蔽铅罐时的输出电流亦用 DSP2032 准确测量并记录。

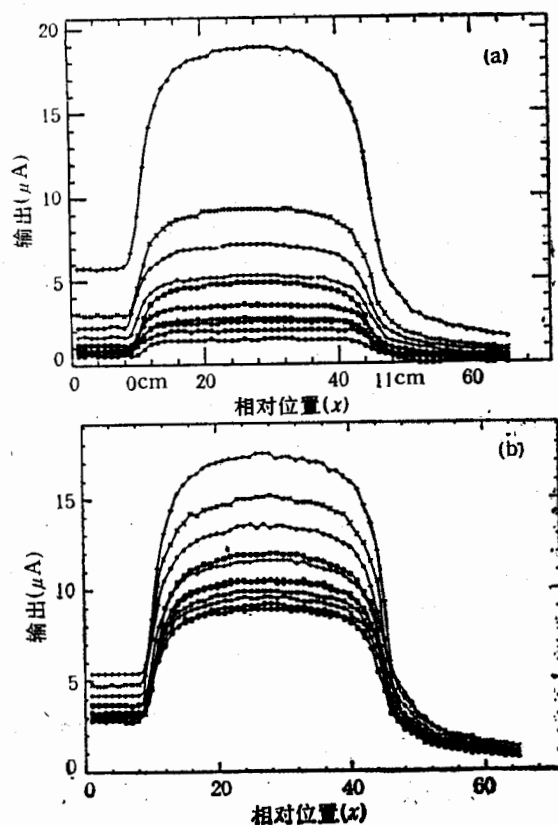


图2 闪烁体瓦片不同位置上的输出

模型#5, 空气

(a) T2; (b) T18

曲线相应的累积辐照剂量由上至下为: 0.000, 0.300, 0.750, 1.125, 1.500, 2.250, 3.000, 3.750, 4.500, 5.250, 6.000Mrad.

## 五、数据分析和实验结果

### 1. 关于数据分析的若干说明

(1) 本底电流的扣除: 辐照令闪烁体激活, 测量时模型所处的环境也可能受加速器状况影响, 因此数据分析时扣除本底十分重要。

(2) 对辐照前的数值归一: 辐照开始前, 对四个模型的横向和纵向断面都用放射源作了刻度, 称之为 0Mrad 值(模型 #6 是 7.5Mrad 值)。不同模型, 或同一模型的不同闪烁体片, 以至于同一闪烁体的不同位置, 其 0Mrad 值并不相同(图 2 和图 4)。为此, 在比较不同剂量辐照后的损伤程度时, 都首先对辐照前的数值加以归一, 称之为相对输出。

(3) 二次归一: 横向数据对瓦片 #18, 纵向对峰 #19 (即瓦片 #19) 二次归一。这是认为在此深度上基本受不到 1.1GeV 电子的辐照, 通过归一可消除光纤、光纤与光电倍增管间的耦合等非闪烁体因素因辐照或运动带来的变化。二次归一后的相对值将主要反映闪烁体本身的辐照损伤。至于横向归一于 #18, 是因为这是本实验有测量数据的最后一

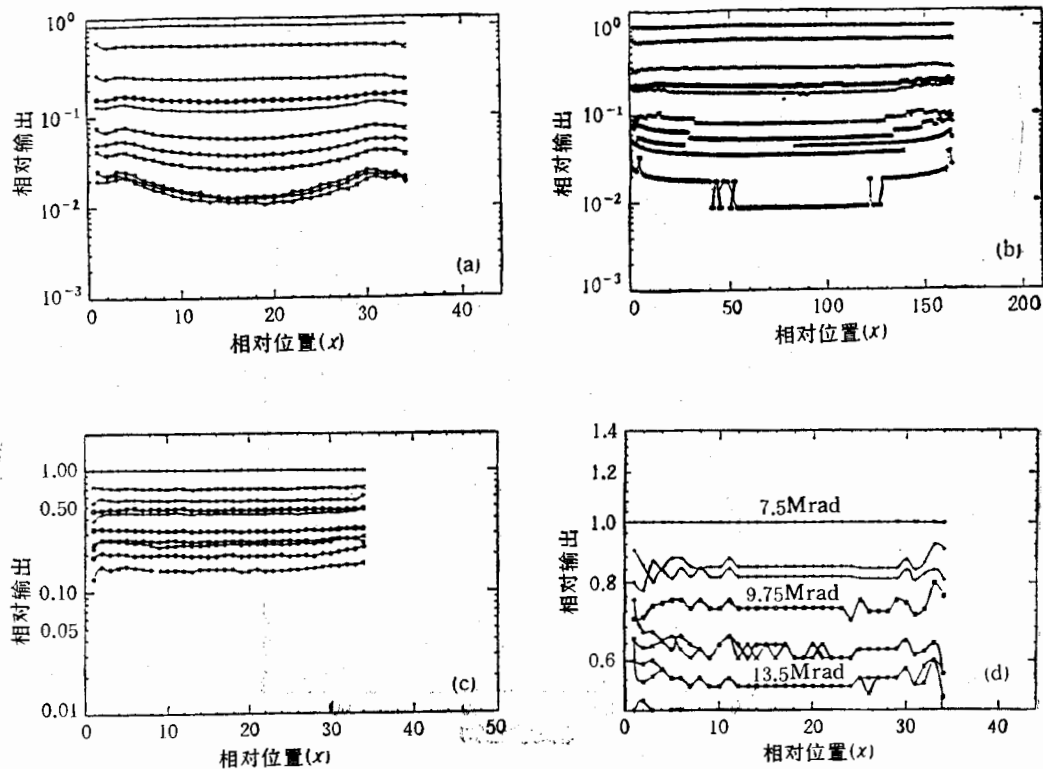


图 3 在闪烁体#6 瓦片的不同位置上的相对输出

(a) 模型#1, T6, N2, 曲线相应的累积辐照剂量由上至下为: 0.000, 0.300, 0.750, 1.125, 1.500, 2.250, 3.0000, 3.750, 4.500, 5.250, 6.000Mrad; (b) 模型#2, T6, N2, 曲线相应的累积辐照剂量由上至下为: 0.000, 0.300, 0.750, 1.125, 2.250, 3.000, 3.750, 4.500Mrad; (c) 模型#5, T6. 空气, 曲线相应的累积辐照剂量由上至下同 (a); (d) 模型#6 T6, 空气。

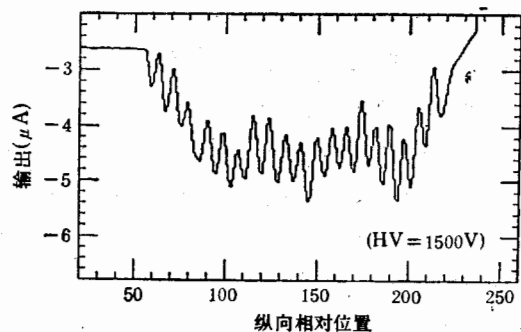


图 4 源纵向扫描的典型输出波形(辐照前  $HV = 1500V$ )

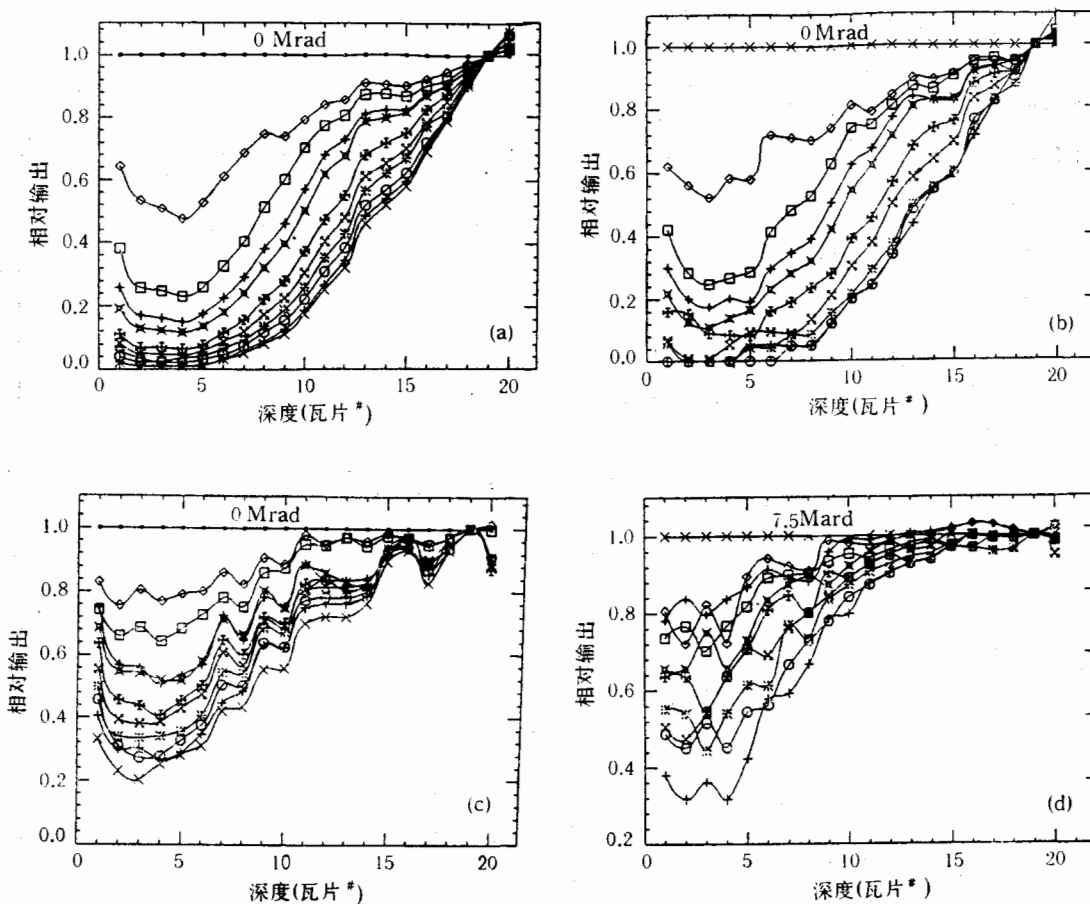


图 5 量能器辐照损伤的纵向断面

(a) 模型#1, L2, N2; (b) 模型#2, L2, N2; (c) 模型#5, L2, 空气; (d) 模型#6, L2, 空气  
 ◇ 0.30 Mrad □ 0.75 Mrad ⊕ 1.13 Mrad × 1.50 Mrad ⊕ 2.25 Mrad ⊗ 3.00 Mrad \* 3.75 Mrad  
 ○ 4.50 Mrad + 5.25 Mrad × 6.00 Mrad

片;纵向归一于 #19, 是因为 #20 受外界影响太多, 会有边缘效应。

## 2. 实验结果

(1) 源的横向扫描 (T1、T4 等): 细管的弯曲差异以及不同源通道内摩擦力的不同, 使放射源的运动速度会略有差别, 形成横向扫描时得到的输出——“宽峰”的宽度略有不同。图 2 是经过宽度校正后, 在不同辐照剂量时的输出相对源运动在闪烁体不同位置上时的典型曲线。不同模型、不同瓦片都可得到类似的曲线图。图 2 仅是其中一例, 从中已可看到, 簇射最大值附近的瓦片 #2, 累积辐照到 6Mrad 时已基本没有输出电流。

为研究辐照是否会造成横向断面输出的不均匀性, 把不同剂量辐照后的输出相对辐照前的数值进行归一, 求得相对值。图 3 显示了在四个模型的瓦片 #6 的不同位置上得到的这种相对输出的曲线。从图中看出横向均匀性很好, 尤其在低于 1Mrad 剂量时, 不论是在氮气中的模型 #1 和 #2, 还是空气中的 #5 基本观察不到相对输出的不均匀性。模型 #6 因是 7.5Mrad 基础上的再辐照, 均匀性较差。

(2) 源的纵向扫描 (L2, L5): 图 4 是辐照前放射源纵向扫描的典型输出波形。20 个峰相应 20 块闪烁体瓦片, 波形随剂量的增加而变化。在高累积剂量辐照后, 簇射最大值附近会几乎看不到峰。图 5 是量能器纵向断面的损伤图。其相对值来自先对辐照前、再

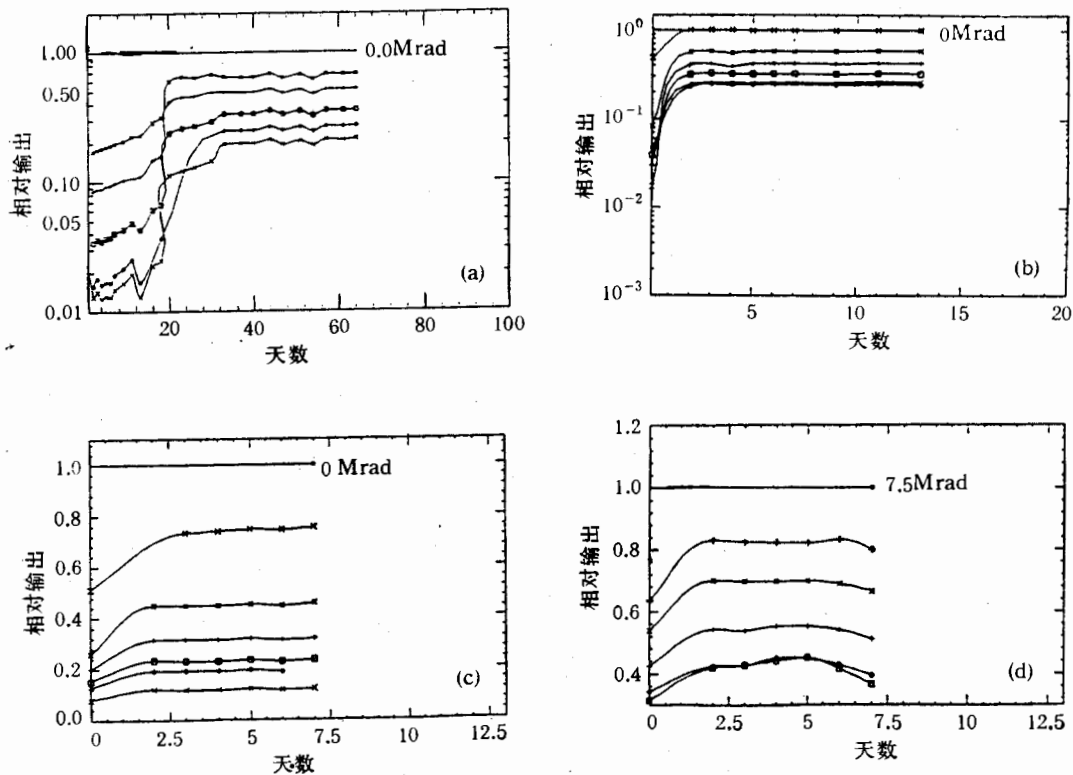


图 6 横向扫描的恢复曲线

(a) 模型#1, N<sub>2</sub> (b) 模型#2, 空气 (c) 模型#5, 空气 (d) 模型#6, 空气  
曲线相应的闪烁体片从上向下是 T10, T8, T6, T4, T2, (c) 中是  
T18, T10, T8, T6, T5, T2

对第 19 峰的两次归一(其中模型#6 的累积剂量仍是由 7.5Mrad [到 13.5Mrad), 曲线很好地揭示了在不同累积剂量时量能器的纵向损伤状况, 与 1.1GeV<sup>-</sup> 在纵向的电磁簇射发展基本一致。由图 5 看出, 对于同一剂量值处于空气中的模型#5 比氮气中的#1 和#2 有较大的相对输出。

(3) 辐照后闪烁体的恢复: 闪烁体的辐照损伤由永久性和非永久性两部分组成, 后者可逐步恢复<sup>[3]</sup>。在达 6Mrad 剂量后停止辐照, 继续测量源扫描的输出, 以观察随时间的恢复。图 6 是相对辐照前归一后瓦片中心的输出值随时间的恢复曲线。图 7 是不同恢复天数时测得的纵向断面上的二次归一的相对输出值, 为便于比较, 图中同时显示了辐照前和 6Mrad 时的曲线。

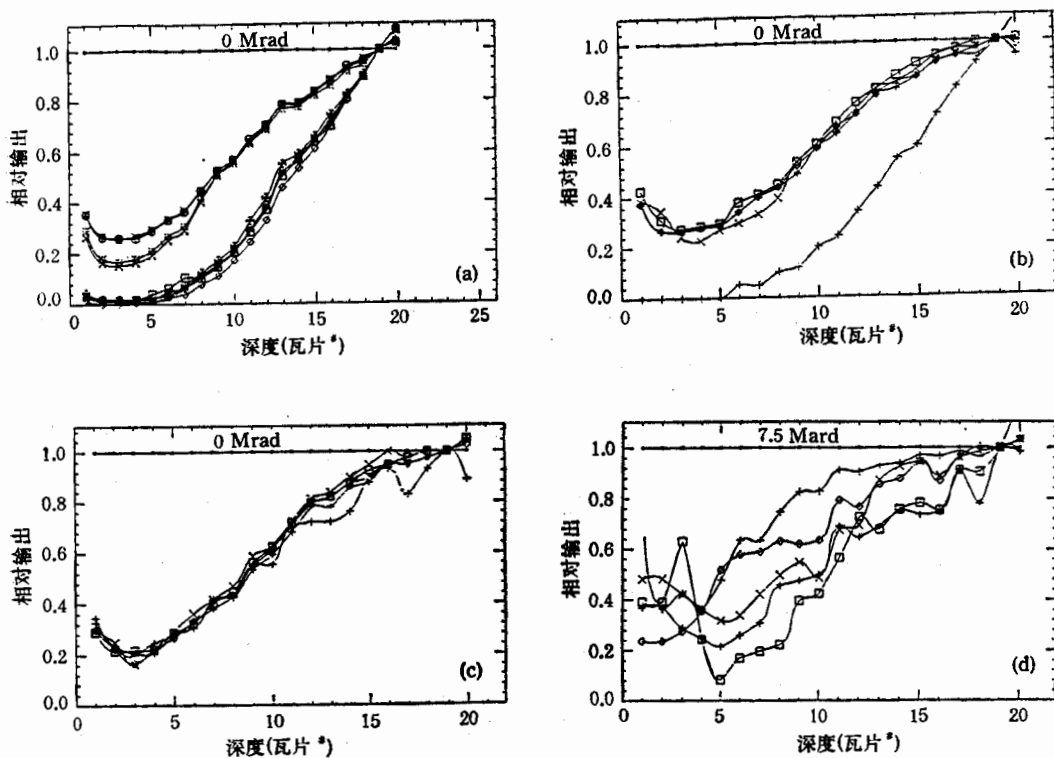


图 7 纵向扫描的恢复曲线

(a) 模型#1, L2, N2,  $\diamond$  6.0Mrad 0天,  $\square$  2天  $\triangle$  4天  $\times$  6天,  $\oplus$  13天,  $\otimes$  20天,  $*$  30天,  $\circ$  40天,  $+$  51天,  $\times$  64天; (b) 模型#2, L2, 空气, +6Mrad 0天,  $\times$  2天,  $\triangle$  3天,  $\square$  13天,  $\diamond$  30天; (c) 模型#5, L2, 空气, +6Mrad 0天,  $\times$  2天,  $\triangle$  3天,  $\square$  13天,  $\diamond$  30天; (d) 模型#6, L2, 空气, +13.5Mrad 0天,  $\times$  2天,  $\triangle$  3天,  $\square$  13天,  $\diamond$  30天。

图 6 和 7 都清楚表明, 恢复速度与环境气体密切相关。处于空气中的模型 #2、#5 和 #6 仅用 2 天时间就恢复到饱和值, 之后不再有恢复迹象。处于氮气中的模型 #1, 直到 50 多天才基本停止恢复(图 6(a), 7(a))。由纵向扫描(图 7)可见, 在恢复完成后损伤最严重处得到的相对输出, 对于模型 #1、#2 和 #5 分别为  $\sim 28\%$ 、 $\sim 26\%$  和  $\sim 22\%$ 。这表明, 在氮气中辐照的模型 #1 和 #2 恢复后的相对输出略大于在空气中辐照的模型 #5, 即氮气中的永久性损伤略小。但差别很小, 在误差范围内甚至可以为恢复后的相对输出基本相同, 约



25%左右。在不同气体条件下恢复速度的显著差别,及恢复后最终值的基本一致这个事实表明,辐照期间模型#5比氮气中的#1和#2有较大相对输出并不意味着空气中的损伤小于氮气,而是损伤的同时在快速恢复。

## 六、结 论

1. 累积剂量达6Mrad时,各模型簇射最大处的闪烁体瓦片已几乎没有输出;经过恢复,可恢复到辐照前的25%左右。

2. 模型#1的恢复值略大于#5的事实表明,于氮气中辐照的永久性损伤略小于空气条件。但空气中的恢复速度远快于氮气中。

3. 模型#6也呈现出一定的恢复特性,但这是归一于7.5Mrad的相对输出值。其绝对输出即使恢复后也已极小。

4. 重要的是,目前估计对于 $10^{34}/\text{cm}^2\cdot\text{s}$ 亮度,十年使用期的SDC桶部量能器仅有0.6Mrad累积剂量,因此完全可使用闪烁体瓦片制作量能器。本实验结果为SDC桶部量能器方案的选定提供了重要依据。

5. 本实验采用通用的闪烁体和光电倍加管。下阶段将试验更耐辐照的闪烁体,并考虑测试不同波长区光灵敏的光纤和光电倍加管,以寻找更好的抗辐照物质和损伤最小的波长区域。辐照损伤的进一步减小,将使该类型量能器不仅更可靠地使用于谱仪桶部,而且可考虑把它们选作更高辐照剂量区的端盖量能器。

本实验得到高能物理所和高能物理所一室领导的大力支持, BEPC 国家实验室和直线加速器室给以有力保证,物资处协助办理海关手续。在实验仪器筹备过程中,一室各兄弟组特别是祝玉灿、吕军光、薛生田、王曼、倪蕙苓、过雅南、白景芝和史焕章,以及兄弟室于传松、唐素秋、盛俊鹏、刘德康、刘永生、马力和叶开荣等都提供了无私的援助。史焕章为本稿作了细致的校核。在此向他们表示衷心感谢。

## 参 考 文 献

- [1] K. Johnson, Internal Report, at Florida State University, 1991.
- [2] V. Barnes and A. Laasanen, "Calibration of Scintillating Calorimeters Using a Moving Radioactive Source"; Presented at the International Conference on Calorimetry, 1990 at FNAL.
- [3] C. Zorn, "Designing a Radiation-Hard Plastic Scintillator for High Luminosity Hadron Collider", Proceedings of Workshop, 1990, at Florida State University.

## Study of Radiation Damage of Tile/Fiber Scintillator Calorimeter

MAO HUI SHUN   WANG GUOLIANG   LIU NIANZONG   ZHANG GE   ZHANG ZHUXIANG  
ZHANG LIANGSHENG   ZHANG CAIDI   ZHENG LINSHENG   ZHOU YONGSHEN   HU LIDONG  
ZHAO XIAOJIAN   ZHONG XUECHU   TAN YIPING   HAN SHIWEN

*(Institute of high energy physics, Academia Sinica, Beijing 100039)*

D. GREEN   A. PARA

*(Fermilab, U. S. A)*

K. JOHNSON

*(Florida State University, U. S. A.)*

### ABSTRACT

The measurement of radiation damage of tile/fiber scintillator modules to be used for the SDC calorimeter are described. Four tile scintillator modules were irradiated up to 6 Mrad with the BEPC 1.1 GeV electron beam. We have studied the light output at different depths in the modules and different integrated doses, the recovery process and the dependence on the ambient atmosphere.