

# 大面积塑料闪烁计数器的制备和测试

郑志鹏 杨春敏 王孟奇 尤铁健  
(中国科学院高能物理研究所) (中国科学技术大学)

## 摘 要

利用国产 ST401 型塑料闪烁体制成了两种尺寸的闪烁计数器:  $50\text{cm} \times 50\text{cm}$ ;  $50\text{cm} \times 100\text{cm}$  (厚均为  $5\text{mm}$ )。对其衰减长度、探测效率等特性进行了测量。实验结果表明其性能良好,可以用于高能物理实验中。

## 一、引 言

在粒子物理实验中,常常使用塑料闪烁计数器,因为它具有发光衰减时间短(几个毫秒)、承受计数率高( $10^7$ 个粒子/秒)、结构简单等优点。随着加速器能量的提高,探测装置也越来越大,要求探测器覆盖面积也相应增加。这样,大面积塑料闪烁计数器的需求也就提到日程上来了。我们利用目前国内生产的最大尺寸的塑料闪烁体 ST401 型( $50\text{cm} \times 50\text{cm}$ ,厚  $5\text{mm}$ )先制成一块闪烁触发计数器(称为  $S_1$ ),并测量了衰减长度、探测效率等性能,然后将两块同样大小的塑料闪烁体粘接在一起,制成了面积为  $50\text{cm} \times 100\text{cm}$  (厚  $5\text{mm}$ )的另一块闪烁触发计数器(称为  $S_2$ ),也测量了各种性能。

## 二、结 构

图 1 给出了  $S_2$  的结构。它由塑料闪烁体、波长位移器、光导、光电倍增管等组成。

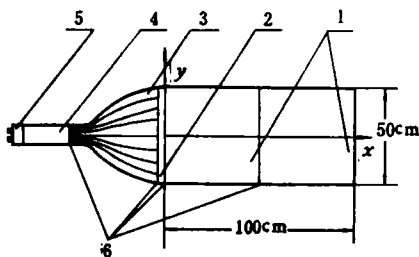


图 1  $S_2$  闪烁计数器的结构

1. 闪烁体; 2. 波长位移器; 3. 光导;  
4. 光电倍增管; 5. 管座; 6. 粘接缝

塑料闪烁体是由两块粘接而成。波长位移器(BBQ)尺寸为  $50\text{cm} \times 1.1\text{cm}$ ,厚  $5\text{mm}$ 。它吸收闪烁体发出的各种波长的光后再发射绿光( $4800 \text{ \AA}$ 左右),从而增加了光导的光衰减长度并且改善了与光电倍增管频谱的响应。光导是用国产有机玻璃弯制而成的扭曲条状光导。光电倍增管使用 XP-2230B 型,为了减小地磁场的影响,其上套以高导磁率合金圆筒做磁屏蔽。

### 三、制 备

**1. 光导** 我们使用的光导如图 2 所示。这种扭曲条状光导比过去采用的楔形或鱼尾形光导有较大的光传输效率。D. Luckey 等人<sup>[1]</sup>首先提出并制作成功第一个扭曲条状光导，以后结构不断得到改进和完善<sup>[2]</sup>。这种光导的光传输效率比其它类型的可高出一、二倍。其原因是：光导分成许多条，光分别在每一条中传播，截面守恒并较好地满足全反射条件。

扭曲加工在 130℃ 左右的烘箱中进行。最大拐弯处的曲率半径  $R \gg 5d$ ,  $d$  是有机玻璃条厚度 (5mm)。详细的工艺过程见文献 [3]。

**2. 闪烁体的粘接** 闪烁体和闪烁体，闪烁体和波长位移器，波长位移器和光导间皆用 Eastman 910 快干胶粘接，该种胶有较好的光学性能，在室温下两分钟左右即可固化。

**3. 封装** 事先对闪烁体、光导进行抛光。然后选用光泽明亮的国产铝箔 (厚  $50\mu$ ) 作反射层，松松地贴在闪烁体、光导上。外层再包上黑塑料布，接缝用黑胶带粘牢，严防漏光。

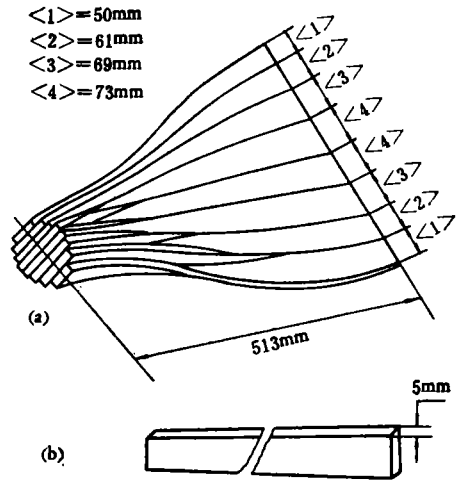


图 2 光导结构示意图

### 四、测 量

**1. 技术衰减长度的测量** 光在闪烁体中按指数衰减规律传播

$$I(x) = I_0 e^{-\frac{x}{\lambda}}$$

其中  $I_0$  是在距离零点处的光强； $I(x)$  是在距零点  $x$  处的光强； $\lambda$  是闪烁体的技术衰减长度。

技术衰减长度是反映闪烁体光传播特性的一个很重要的量，我们采用了三种不同的方法对它进行了测量：(i) 将 350 微居的  $^{90}\text{Sr}$   $\beta$  源，分别放在  $x = 0, 10, 20, \dots, 100$  厘米处，用示波器观察相应的输出脉冲幅度。(ii) 与上述方法相似，但输出信号用多道脉冲幅度分析器记录。(iii) 测宇宙线 (大部分为  $\mu$  子) 在不同距离处相应的输出脉冲幅度。

三种不同方法测量到的  $S_1$  的衰减曲线表示在图 3 中。分别得到的衰减长度  $\lambda$  值为：48.0cm, 46.2cm, 47.5cm, 平均值  $\lambda = 47.2 \pm 0.8\text{cm}$ 。  $\lambda$  值是由衰减曲线的前面部分直线的斜率得到

$$\lambda = \frac{x_2 - x_1}{\lg A_1 - \lg A_2} \lg e.$$

$A_1, A_2$  分别为直线上相应距离  $x_1, x_2$  处的脉冲幅度。

因为  $\beta$  源出来的电子能量是连续分布的,因而输出脉冲幅度也是连续分布的,不像  $\gamma$  射线打在 NaI(Tl) 晶体上输出脉冲有全能峰,因此对方法 I 和 II 就有一个如何选取标准的问题。在用示波器观察时,我们固定示波器触发灵敏度,以一定重复频率的脉冲(幅度略小于最大脉冲)为标准。目测方法简便,但不容易读得准,需要一定经验。

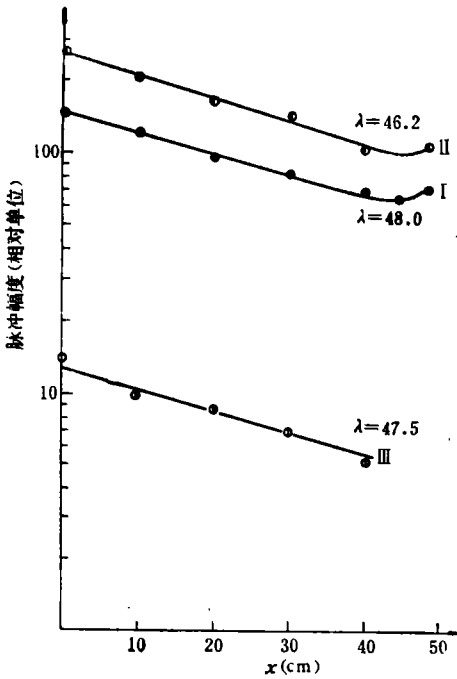


图3 三种不同方法测量到的  $S_1$  的衰减曲线  
曲线右边的罗马数字表示相应的方法顺序

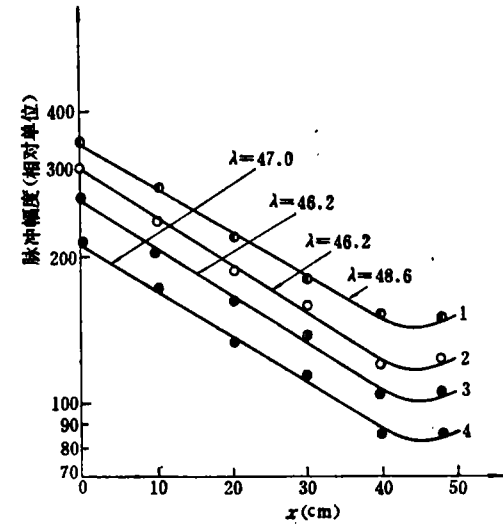


图4 对  $S_1$  闪烁计数器,相应于不同积分计数的标准测量到的衰减曲线

方法 III 首先将多道脉冲幅度分析器测量到的脉冲幅度谱全部打印出来,然后选取相应于一定积分计数的脉冲幅度为标准(积分计数是指大于该脉冲幅度标准的总计数)。我们研究了选取不同积分计数相应的标准对衰减长度测量的影响。图4给出了相应于四组不同积分计数的标准测量到的衰减曲线。

曲线1相应于最大脉冲幅度为标准(或积分计数为零);曲线2相应于1000个积分计数;曲线3相应于5000个积分计数;曲线4相应于30000个积分计数(以上计数时间皆为两分钟)。曲线2、3、4斜率相近,说明在上述范围内,积分计数的选取对衰减长度的影响不大。这是因为:(i)在统计误差范围内,放射源单位时间放出的粒子数是守恒的;(ii)当放射源从一点( $x_1$ )到另一点( $x_2$ ),各种不同幅度的脉冲都以同样比例( $e^{-\frac{x_2-x_1}{\lambda}}$ )衰减。

曲线1相应的衰减长度偏大,是因为随距离  $x$  增大,接收到的光子数目减少,脉冲分布展宽,底部影响较大的原因。又由于此处计数少,统计误差大,因此常常不选用最大脉冲幅度为标准。积分计数也不能选取太大,否则噪音信号会混入,使得测量到的衰减长度值偏大。

在实际测量过程中,应根据放射源强度等情况选取合适的积分计数范围。对于我们的条件,积分计数从1000到30000个(每两分钟)是合适的。

测量时要注意扣除本底计数。

我们还测量了  $S_2$  的衰减曲线如图 5。曲线 1 是用多道脉冲分析器测量，曲线 2 是用示波器目测的。在 50cm 处有折断，是由于粘接处胶的吸收引起。我们发现，可以根据 CD 间台阶的高度来判断粘接的质量。这个方法有较高的精度和可靠性。对于  $S_2$ ，CD 的高度与 D 处脉冲幅度之比为 7%，根据经验，说明粘接是成功的。若相对跌落值大于 15% 则是不允许的，需要重新粘接。

C 点略有抬高，是由于粘接面反射的原因。

ABC 与 DEF 两段有不同的斜率（即衰减长度），是因为在塑料闪烁体中，发射谱与吸收谱重迭处相应于发射谱的短波部分，因而短波部分易于吸收，长波部分却有较长的衰减长度（相应于 DEF 段）。即使当中无粘接， $S_2$  为一块完整的闪烁体，也存在类似的情况。

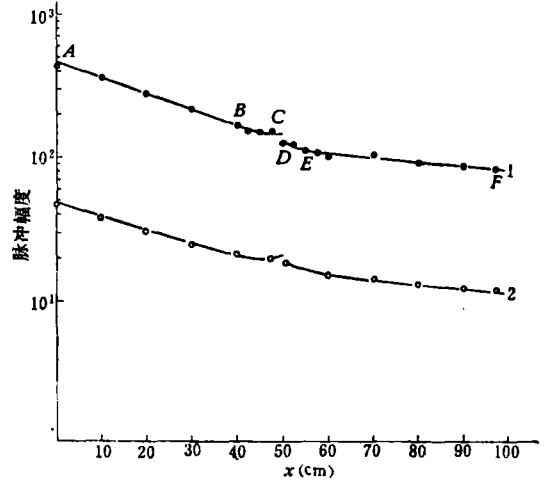


图 5  $S_2$  的衰减曲线，中间折断处相应于粘接缝

用宇宙线测闪烁计数器技术衰减长度装置如图 6 所示。两个小闪烁计数器  $M_1, M_2$  是选择位置用的，其面积均为  $7 \times 10\text{cm}^2$ （厚 6mm），分别放在  $S_1$  的上、下方，垂直交迭。（光电倍增管皆为 XP-2230B）。 $M_1, M_2$  输出信号分别经过甄别、成形后符合，符合输出再经过拉宽、放大进入 512 道脉冲分析器的符合门作为  $S_1$  的开门信号。 $S_1$  的输出脉冲经过放大后输入多道。这样我们就选择了穿过  $M_1, S_1, M_2$  的宇宙线（75% 是  $\mu$  子）。改变  $M_1, M_2$  的位置就相应于改变  $S_1$  被测部分的位置。由于大多数  $\mu$  子穿过闪烁体接近最小电离（在塑料闪烁体中最小电离值为  $2\text{MeV/cm}$ ），因此  $\mu$  子垂直穿透厚度为  $d$  cm 的塑料闪烁体，在其中损失的能量近似为  $2d$  MeV，是一个常数。所以，当我们选取闪烁计数器不同位置测量到的  $\mu$  子脉冲幅度谱峰值的变化仅是由于光的衰减引起，测量出这一变化，就可推算出衰减长度。

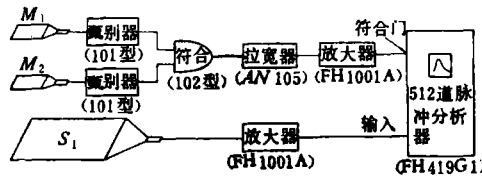


图 6 宇宙线测量  $S_1$  的衰减长度装置

由于宇宙线计数率低（在海平面，垂直入射的强度为  $1.8 \times 10^{-2}/\text{厘米}^2 \cdot \text{秒}$ ），穿过  $M_1, M_2$  的带电粒子每秒钟不到一个，因此记录一个谱需要较长的时间。对  $S_1$ ，我们测量了五个位置，每次测量时间在六小时以上。

图 7 给出了  $x = 40\text{cm}$  处的一个脉冲幅度谱形状。由于衰减的原因，这个谱是五个

中统计最差的一个。记录了六小时，峰值计数只有 65 个。尽管这样，峰的位置还是不难确定的。峰的位置是用重心法求出的。

图 3 的曲线 (iii) 是用最小二乘法拟合的直线。

由于  $M_1, M_2$  不是一个点, 而有一定面积, 这就带来了位置测量系统误差。似乎它们应尽可能地小, 其实不然。因为这样将牺牲计数率, 使统计性变坏。因此, 它的大小应有一最佳值。通常在测量一米或一米以上长度的闪烁计数器时, 取  $M_1, M_2$  长、宽分别为几个厘米为宜。

**2. 探测效率的测量** 探测效率是闪烁计数器的一个重要指标, 特别是触发计数器, 我们希望对带电粒子的探测效率接近百分之百。测量坪曲线是决定计数器光电倍增管高压工作点的依据。

我们采用测量探测效率的装置如图 8。

$M_1, M_2$  (尺寸、位置如前所述) 的工作电压事先调好, 使得对入射带电粒子的探测效率接近百分之百 (例如, 使束流穿过它们, 两重符合计数进入坪区)。

当一束粒子穿过  $M_1, S_1, M_2$  后,  $M_1, M_2$  的输出经甄别、成形后符合, 符合输出与经过放大、甄别、成形后的  $S_1$  输出再符合, 此时从定标器可分别读出三重符合与两重符合计数, 探测效率  $\eta$  为它们之比

$$\eta = \frac{M_1 \cdot M_2 \cdot S_1}{M_1 \cdot M_2}$$

在测量中仍使用宇宙线 ( $\mu$ ), 为了有足够好的统计, 每次取两重符合计数一百个。符合测量计数服从二项式分布, 其误差为

$$\sigma = \sqrt{N_0 \eta (1 - \eta)} = \sqrt{\frac{N(N_0 - N)}{N_0}}$$

其中  $N_0$  为两重符合计数,  $N$  为三重符合计数。

当  $\eta = 50\%$ ,  $\sigma$  最大, 等于 5;  $\eta = 99\%$ ,  $\sigma = 1$ 。若记一百个两重符合计数, 则相对误差分别为 5% 和 1%。而坪曲线关键部分在拐弯处 ( $\eta$  为 95% 以上的地方), 在这一段相对误差为 1—2%, 满足我们的要求。

移动  $M_1, M_2$ , 可测到  $S_1$  不同位置的效率坪曲线, 如图 9。曲线 1、2、3 分别在 2100、2225、2350 伏到达坪区。坪电压不同是因为随  $x$  增大, 光衰减愈甚, 信号愈小。这样必须增加光电倍增管高压来提高放大倍数, 以使最小电离信号也能记录下来。

曲线 1 较陡, 很快进入坪区; 曲线 2 变得平缓, 较慢进入坪区; 曲线 3 则最慢进入坪区。这是因为靠近光电倍增管处, 光脉冲强, 在光阴极上打出的光电子数目多, 因而统计

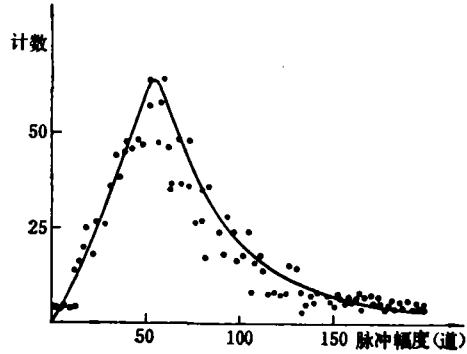


图 7 在  $x = 40$  厘米处的一个宇宙线 ( $\mu$ ) 脉冲幅度分布

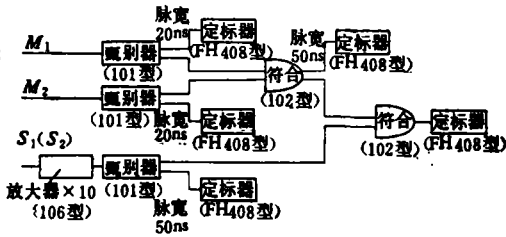


图 8 探测效率测量装置

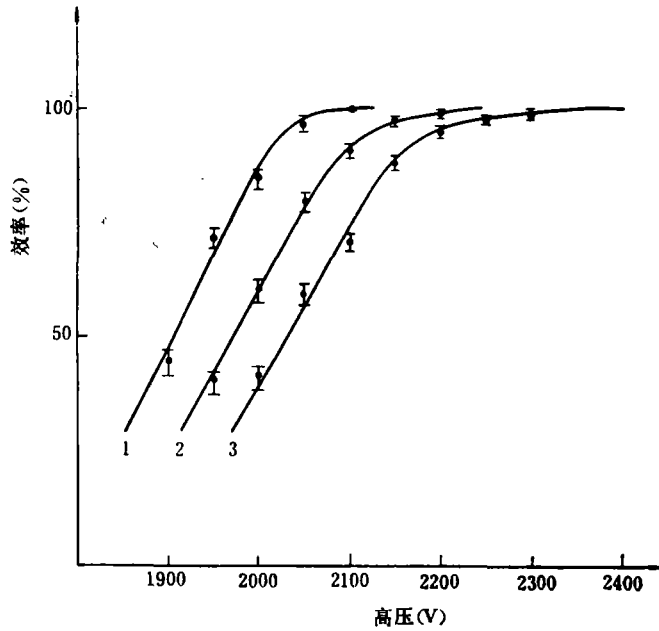


图 9  $S_1$  的效率坪曲线, 曲线 1、2、3 相应于不同的位置  
 1.  $x = 3.5\text{cm}$  2.  $x = 23.5\text{cm}$  3.  $x = 43.5\text{cm}$

性好, 脉冲谱半高宽就小 (半高宽  $\Gamma \propto \frac{1}{\sqrt{n}}$ ,  $n$  为光电子数)。而效率曲线是对脉冲谱的积分, 因此这样近处的效率曲线较易进入坪区。

我们将曲线 3 达到坪区的电压 2350 伏 + 50 伏 = 2400 伏, 定为该计数器 ( $S_1$ ) 的工

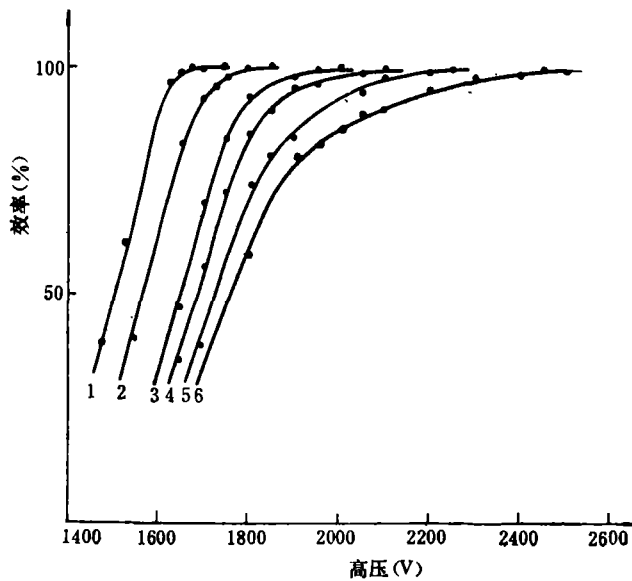


图 10  $S_2$  的效率坪曲线

作电压 (XP-2230B 的最高电压为 3000 伏)。加 50 伏是考虑了 Y 方向的差别以及光电倍增管、电子学仪器长期稳定性的结果。

图 10 给出了  $S_2$  的效率坪曲线。由于  $S_2$  比  $S_1$  长了一倍, 为了补偿光的衰减, 我们又加了一级十倍放大。

曲线 6 相应于  $S_2$  的末端位置, 进入坪区非常缓慢, 原因是光衰减太大, 收集到的光子数少, 脉冲谱很宽的原因。这样要到 2400 伏才进入坪区 (效率 99%)。我们取  $S_2$  的工作电压为 2450 伏, 此时在  $S_2$  各处探测效率达 99% 或 99% 以上。

从曲线 6 的形状可以看出, 对 47 厘米衰减长度的闪烁体, 一米长度差不多达到它的极限尺寸了。

经过长时间 (连续 48 小时) 考验,  $S_2$  工作稳定, 每一位置坪电压的移动小于 50 伏。

**3. 脉冲时间特性** 将  $^{90}\text{Sr}$   $\beta$  源放在  $S_2$  的末端, 得到脉冲波形如图 11 所示。这是一个连续脉冲分布, 为清楚起见, 图 12 绘出了  $S_2$  前端和末端单个脉冲的形状。

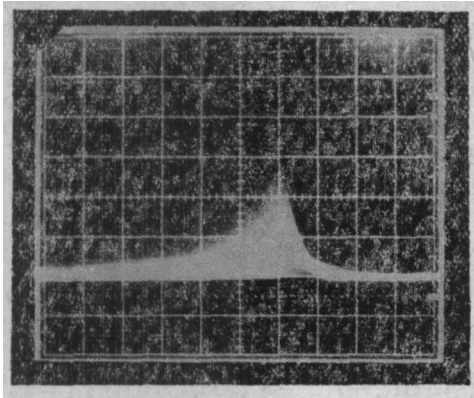


图 11  $^{90}\text{Sr}$   $\beta$  源放在  $S_2$  末端上给出的脉冲波形照片, 横座标一大格表示 5ns, 纵座标一大格表示 50mV, 示波器为 465 型

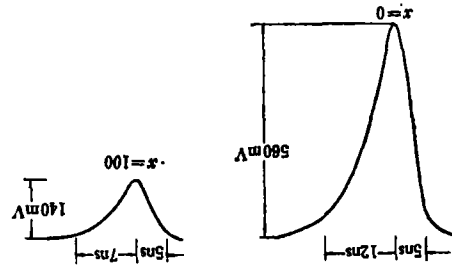


图 12 单个脉冲的形状, 左边为  $S_2$  的前端, 右边为末端的波形

脉冲前沿上升时间为 5 毫微秒, 其中包括了闪烁体的发光时间 (2 毫微秒), 光电倍增管的上升时间 (XP-2230B 的上升时间为 1.6 毫微秒) 以及分压器输出  $RC$  时间常数的贡献。

## 五、结 论

我们制造的  $S_1$ ,  $S_2$  两块塑料闪烁计数器, 对衰减长度, 探测效率, 脉冲上升时间, 稳定性等项指标测试以及实际使用过程证明它们性能良好, 可以做为大面积触发计数器应用于高能物理实验中。

唐孝威同志对本工作给予许多有益指导, 荣刚同志参加了部分工作, 在此表示感谢。

## 参 考 文 献

- [1] P. Gorenstein and D. Luckey, *Rev. Sci. Instr.*, **34**(1963), 196.
- [2] D. G. Crabb et al., *Nucl. Instr. Meth.*, **45**(1966), 45.
- [3] 杨春敏、郑志鹏, 扭曲光导的制备, 核电子学与探测技术, 待发表。

## THE MANUFACTURE AND TEST OF LARGE AREA PLASTIC SCINTILLATION COUNTERS

ZHENG ZHI-PENG YANG CHUN-MIN WANG MENG-QI

*(Institute of High Energy Physics, Academia Sinica)*

YOU TIE-JIAN

*(University of Science and Technology of China)*

### ABSTRACT

Two large area plastic scintillation counters (50 cm × 50 cm and 50 cm × 100 cm, 0.5 cm thick) have been built with the scintillator type ST-401 made in China. The characteristic parameters of the counters, such as the attenuation length and the detection efficiency have been measured. The results show that the quality of the counters is desirable and that they can be used as trigger counters in experiments of high energy physics.