

闪烁光纤光传输特性的研究*

汪晓莲 许咨宗 侯云珍 汪兆民 陈宏芳 李澄 曾晖

(中国科学技术大学近代物理系 合肥 230026)

1996-11-22 收稿

摘 要

给出了闪烁光纤光产额的测量结果,研究了其传输衰减和时间特性,并对几种不同型号的光纤进行了比较.

关键词 闪烁光纤, 光产额, 衰减特性.

1 引 言

闪烁光纤是一种兼有射线探测和光信号传输功能的功能元件. 近年来,随着高能物理的发展和各种像增强技术的出现,使闪烁光纤技术得到了迅速发展. 与普通闪烁体相比,闪烁光纤的传输衰减和时间特性都有了很大的改善^[1]. 闪烁光纤可以弯成不同的形状,可以延伸到空间任何位置,用其组成的探测器具有空间分辨好、时间分辨好、机械可塑性好等优点,因此受到高能物理学家的普遍重视,目前正广泛地应用于核与粒子物理实验中^[2-4],同时在工业、医学、生物的射线成像系统中也将有重要的应用^[5-6].

闪烁光纤主要由两部分组成:核心部分(芯层)和表面涂层部分(包层). 这两部分材料的光学折射率是不同的,芯层略高于包层. 以塑料闪烁光纤为例,芯层的材料主要是聚苯乙烯和聚乙烯基甲苯加闪烁物质,折射率 $n_1 \approx 1.60$,而包层的折射率 $n_2 \approx 1.49$. 当带电粒子或射线穿过闪烁光纤时,在芯层产生的闪烁发光只有很小一部分,即只有

$\left(1 - \frac{n_2}{n_1}\right) < 10\%$ 左右,可沿光纤传播,原理如图 1 所示.

能够被闪烁光纤收集并传输的光,其接收角应该满足如下关系:

$$\cos \alpha_1 = \sin \theta \sqrt{1 - \left(\frac{x}{r} \cos \phi\right)^2} \leq \sqrt{1 - \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2}, \quad (1)$$

式中角度 α_1 为界面反射角, θ, ϕ 的定义如图 1, n_1, n_2 分别是芯层和包层的折射率. 满足上述条件的光能够在芯层和包层界面上发生全反射. 接收角满足

* 国家自然科学基金资助.

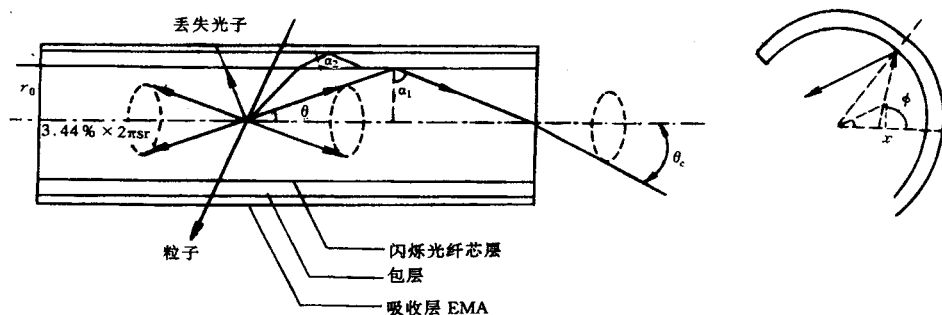


图 1 闪烁光纤光收集的原理示意

$$\cos \alpha_2 \leq \sqrt{1 - \left(\frac{1}{n_2}\right)^2} \quad (2)$$

的光也会被收集, 其中, α_2 为闪烁光在包层与空气界面上的反射角, 满足如下关系:

$$\begin{aligned} \cos^2 \alpha_2 &= \left(\frac{r_0}{r_c}\right)^2 \cos^2 \alpha_{11} + \left[1 - \left(\frac{r_0}{r_c}\right)^2\right] \sin^2 \theta_c, \\ \cos \theta_c &= \frac{n_2}{n_1} \cos \theta, \quad \cos \alpha_{11} = \frac{n_2}{n_1} \cos \alpha_1, \end{aligned} \quad (3)$$

式中 r_0 是光纤芯层半径, r_c 是光纤总的半径, 由于包层很薄 ($\sim 30\mu\text{m}$), $r_c \approx r_0 \approx r$. 这里称满足式 (1) 的光为芯层光, 满足式 (2) 的光为包层光. 其它的光在两界面处都不发生全反射, 很快便跑出光纤, 称为非全反射光.

使用闪烁光纤时, 光的传输衰减长度、光传输的时间特性等都直接影响光纤组成的探测器的性能指标, 因而是闪烁光纤的重要物理参数. 本文系统地测量了几种典型光纤的这些重要性能.

2 实验装置

测量了美国 Bicon 公司 BCF10、日本 Kuraray 公司 SCSF81 和意大利 Pol. Hi Tech. 公司 0046 几种闪烁光纤. 光纤的直径都是 1mm, 长 1m—3.5m. 图 2 给出了本实验使用的实验装置. 用准直的 ^{90}Sr 放射源 (最大端点能量 2.2MeV) 电子束照射闪烁光纤, 用 XP2262B 光电倍增管测量闪烁光纤的信号, 用一块小的塑料闪烁体作二重符合. 做能谱测量时, 闪烁光纤的信号经成形 (电荷) 放大器送入多道, 二重符合信号作为多道的开门信号; 做时间测量时, 闪烁光纤的信号经 Otec 快放大器, 送到恒比甄别器 (CFD), 再送入时幅转换器 (TAC) 作为停止信号, 塑料闪烁体的信号经 CFD 后作为 TAC 的起始信号.

测量中一个重要的问题是保持实验的重复性. 单根闪烁光纤的光电子数很低 (在 5cm 处, 平均每个事例光电倍增管能产生的光电子数约 10 个), 半径太小, 这个问题十分重

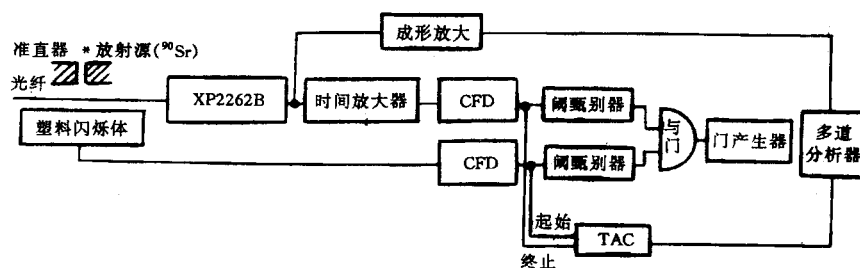


图 2 实验装置逻辑框图

要。实验中采取了一系列措施,得到一组可靠的合理的结果。

3 实验分析及测量结果

3.1 闪烁光传输衰减特性

光电倍增管将接收到的闪烁光转化为电信号,经放大送入脉冲幅度分析器,最后得到图 3 所示的能谱。为得到每次事例的平均光电子数,用如下公式对测得的能谱拟合:

$$P(\text{channel}) = \sum_n P(n, \mu, r) \cdot F(\text{channel}, n),$$

$$P(n, \mu, r) = \int_0^r \frac{dx}{\sqrt{r^2 - x^2}} \frac{(\mu \cdot x)^n \cdot \exp(-\mu \cdot x)}{n!}, \quad (4)$$

式中 $P(n, \mu, r)$ 为在半径等于 r 的光纤中产生 n 个光子的几率, $F(\text{channel}, n)$ 是光电倍增管响应函数; μ 为最小电离粒子在闪烁光纤中平均每 1mm 沉积的能量在光电倍增管的光阴极产生的平均光电子数,是平均光电子数 $N_{p,e}$ 的表征参数。

闪烁光纤输出的平均光电子数 $N_{p,e}$ 随激发源到光电倍增管光阴极的距离 L 的变化关系如图 4 所示,它代表闪烁光纤的发光衰减特性。对大块闪烁体, $N_{p,e}$ 与 L 满足指数关系

$$N_{p,e} = N_{p,e,0} \cdot \exp(-L/\lambda), \quad (5)$$

式中 $N_{p,e,0}$ 为 L 为零处的平均光电子数,

λ 为衰减长度。由图 4 可以看出,闪烁光纤不满足上述关系,在近距离处 ($< 30\text{cm}$), 光衰减得较快,随距离的增加,光衰减得越来越慢,在较远处近似为一直线,满足指数关系。造成这种现象的因素很多,其中主要的有光的收集角、界面反射系数(包括芯层-包层,包层-

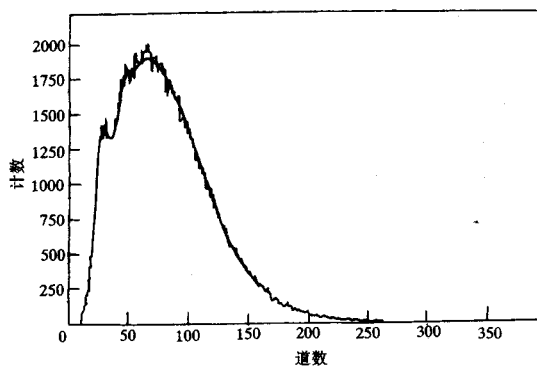


图 3 源距光电倍增管 120cm 处测得的 SCSF-81 光纤能谱
实线为拟合曲线

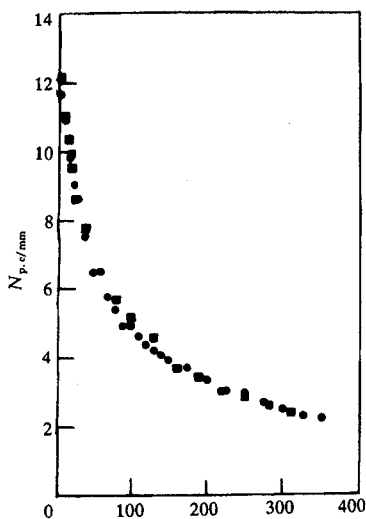


图 4 衰减曲线

■ 0046; ● SCSF-81.

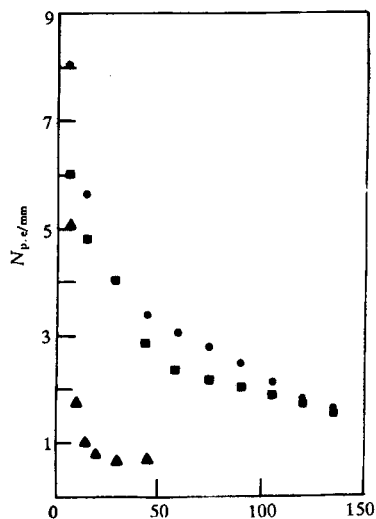


图 5 芯层光和包层光分离的衰减曲线

● 两种光; ■ 芯层光; ▲ 包层光.

空气界面)等因素的影响。

芯层光收集角较小,光程短,衰减必然慢,相对来说,包层光则相反,衰减较快,仅在近距离处有贡献,设想这两种光叠加的结果形成图 4 所示的闪烁光纤衰减曲线。为了证实这一设想,可以利用芯层、包层折射率不同,芯层光和包层光会形成不同的光锥,而把两种光分离^[1],分别测量其衰减曲线。发现两种光加在一起,与总的光电子数相当,结果见图 5。

3.2 闪烁光纤时间特性的测量

由于闪烁光纤光收集角很小,光程短,而且光程涨落小,因此具有较小的传播时间涨落,另一方面,由于只有少部分光被收集,光阴极光电子数较少,因此,测得的时间谱不仅反映了闪烁光传输过程中引起的时间分散,而且在一定程度上包含了闪烁材料的荧光时间衰减特性。图 6 是用闪烁光作为定时信号,源距光电倍增管 15cm 处测得的时间谱,可以看出它并不对称。用 FWHM 来表征单根光纤的时间特性,图 7 给出了单根光纤的时间分辨

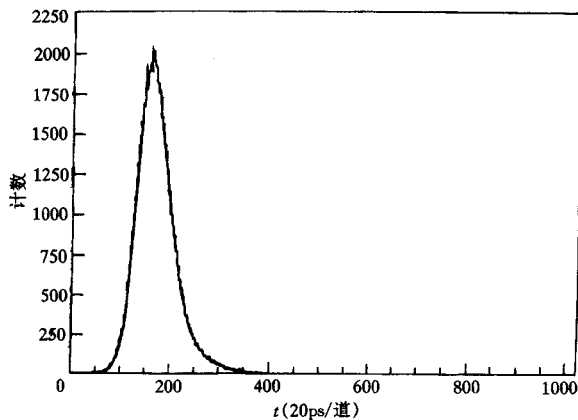


图 6 Pol. hi. tech. 0046 光纤时间特性谱

随源距光电倍增管的距离的变化关系。图中直线为线性拟合的结果。闪烁光在光纤中的

收集传输总时间 σ_t 随传播距离变化的曲线见图 8。在图 6、7 中 t 是闪烁光在光纤中的传播时间,

$$t = t_0 + L / v_{\text{eff}}, \quad (6)$$

式中 L 是激发源到光电倍增管的距离, v_{eff} 具有速度的量纲, 可以看作闪烁光在光纤中传播的有效速度, t_0 是一个常数, 为测量系统本身设置的。

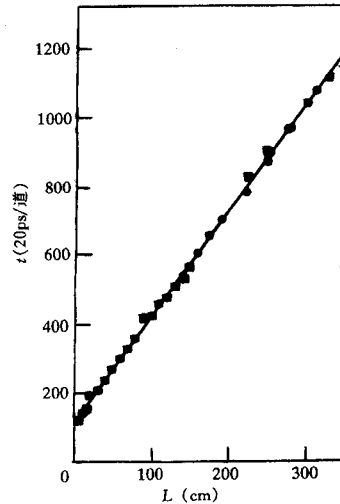


图7 光纤时间分辨随距离的变化关系

● 0046; ■ SCSF-81.

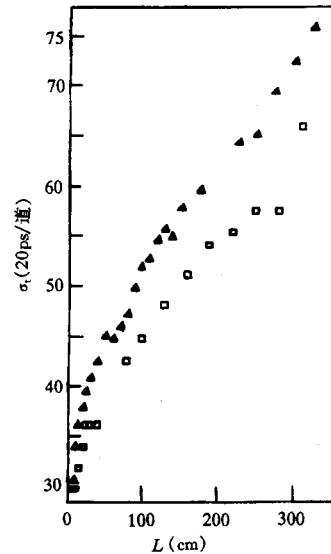


图8 闪烁光的传输收集时间随距离的变化曲线

□ 0046; ▲ SCSF-81.

测量并比较了几种闪烁光纤的性能, 结果见表 1。表中 $N_{p,e}$ 为平均输出的光电子数, λ_{att} 为荧光衰减长度, λ_{peak} 为激发光谱峰值波长。

表1 各种闪烁光纤性能比较表

| 光 纤 | λ_{peak} (nm) | λ_{att} (cm) | $N_{p,e}$ (5cm) | $N_{p,e}$ (1m) |
|---------------------|------------------------------|-----------------------------|-----------------|----------------|
| Bicron BCF10 | 430 | 145 | 8.1 | 2.1 |
| Kuraray SCSF81 | 430 | 284 | 11.8 | 5.4 |
| Pol. hi. tech. 0046 | 437 | 246 | 12.5 | 5.8 |

4 结 论

仔细测量了单根闪烁光纤的光产额、荧光传输的衰减特性、荧光的时间特性等: 在离激发源 1m 处光电倍增管收集到的平均光电子数约 5 个; 芯层光的传输衰减长度为 2.5m 左右; 闪烁光在闪烁光纤中的平均传播速度为 17cm/ns。影响闪烁光收集效率的因素主要是光的收集角和界面处的反射系数, 闪烁光可适用于定时。测量结果表明, 光纤 Kuraray SCSF-81 和 Pol. hi. tech. 0046 的光产额性能相近(后者略大), 但 SCSF-81 衰减

长度略大于 Pol. hi. tech. 0046 光纤, 具有更好的传输衰减特性; 在时间特性上, Pol. hi. tech. 0046 的时间分散略小.

闪烁光纤既可以单根光纤读出(与像增强器配合)作为高位置分辨的射线探测元件, 又可以组成光纤块, 做成具有好的时间分辨的谱仪的射线探测器.

参 考 文 献

- [1] C. M. Hawkes *et al.*, *NIM*, **A292**(1990)329.
- [2] F. G. Hartjes *et al.*, *NIM*, **A277**(1989)379.
- [3] KLOE Collaboration, A General Purpose Detector for DAΦNE, LNF-92 / 019(IR).
- [4] HI Spacal Group, Performance of an Electromagnetic Lead / Scintillating Fibres Calorimeter for HI Detector, Desy 95-165.
- [5] FAROS Collaboration, Fast Readout of Scintillating Fiber Arrays Using Position-Sensitive Photomultipliers, CERN-PPE / 94-126.
- [6] C. D' Ambrosio *et al.*, *NIM* **A325**(1993)161.

Study of Light Propagation Characteristics of Scintillating Fibres

Wang Xiaolian Xu Zizong Hou Yunzhen Wang Zhaomin
Chen Hongfang Li Cheng Zeng Hui

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

Received 22 November 1996

Abstract

The light yield, time characteristics of light propagation and attenuation length of some kinds of scintillating fibres are presented in this paper. Comparison of these characteristics of several fibres is also performed.

Key words scintillating fibre, light yield, propagation characteristics.