

闪烁光纤发光时间特性的测量

夏小米¹⁾ 王曼 方建 周莉 赖元芬 吕军光

(中国科学院高能物理研究所 北京 100039)

摘要 文中介绍了闪烁光纤发光时间常数的测量方法及测量系统本身时间分辨的校正方法,并对两种塑料闪烁光纤的时间特性进行了测量.

关键词 闪烁光纤 发光衰减时间 单光电子 切伦科夫辐射

铅-塑料闪烁光纤取样型量能器是北京谱仪升级改造的候选方案之一.如果选用此方案,未来的量能器将由4米长的铅-塑料闪烁光纤量能器单元组成,信号由与单元两端耦合的抗磁场光电倍增管读出.簇射沿轴向(z 方向)的坐标由量能器单元两端输出信号的时间差确定.因此,对闪烁光纤除了要求发光效率高和衰减长度长以外,还要求发光衰减时间短,能获得较好的时间分辨率,达到定位精度的要求.本工作采用单光电子相关时间测量法^[1]测量了两种直径 $\phi = 1\text{mm}$ 不同型号光纤的发光时间特性.

有机物质的发光是分子的固有特性,不仅存在于晶体中也存在于蒸汽、液体或塑料中.有机闪烁体是纯的或取代的芳香碳氢化合物,其中的苯环构成一个稳态和各种振动态(π 电子).这种结构易于被带电粒子激发到高振动态然后迅速(\sim 几个 ns)退激而发光.虽然在发光衰减前($\sim 10^{-12}\text{s}$)由于和相邻分子的碰撞损失过剩的振动能使得发射光谱向长波方向位移,但在绝大多数闪烁体中发射光谱与吸收(或激发)光谱严重重叠造成发射光在闪烁体中的自吸收.为了使发射光能在闪烁体中很好传输,在闪烁体中再加入另外一种荧光成分,它易于吸收闪烁光并发射较长波长的光.由于第二种成分(波长位移成分)有很大的吸收截面,通常它占的比很小,典型的重量百分比为0.01%—1%,还可以加入多种波长位移成分使得最终光具有足够长的波长因而有好的透过率.通常塑料闪烁体发射光的时间分布由快成分和慢成分两部分组成,可用下式描述^[2]:

$$E(t) = \frac{e^{-t/\tau_2} - e^{-t/\tau_1}}{\tau_2 - \tau_1} + \frac{R}{\tau_3} e^{-t/\tau_3}, \quad (1)$$

式中 τ_1 是快成分的上升时间,由入射粒子与闪烁体相互作用的能量转换时间决定^[3]; τ_2 为快成分的发光衰减常数; τ_3 为慢成分的发光衰减常数; R 慢成分和快成分的比例.本实验对光纤中闪烁体发光衰减时间进行测量.

1 测量装置

通常闪烁体发光的时间谱不仅包含闪烁材料的荧光发射时间特性,而且还包含闪烁光传输过程中的时间分散.为了测量闪烁材料的发光衰减常数,故选用单光子相关时间测量技术.图1为实验装置示意图.为了得到精确的起始时间信号,我们用2cm厚的塑料闪烁体($2 \times 2.5 \times 16\text{cm}^3$)放在所测光纤下方作为触发计数的探测元件,两端均与光电倍增管(PMT1, PMT2)耦合.经过准直的放射源 ^{90}Sr ($\sim 26\text{MBq}$)放在待测光纤上方.为降低倍增管噪音的影响,用倍增管PMT1和PMT2的符合信号作为触发信号.这样,只有垂直穿过待测光纤并被触发计数器所探测到的能量较高的 β 粒子才能判为好事例给出触发信号.我们将放射源置于长闪烁光纤的上方使光纤激发发光,并控制光纤的一端面离倍增管光阴极1.5cm远,保证入射光极微弱,以获得单光电子的时间分布.

2002-09-27 收稿

1) E-mail: xiaxm@mail.ihep.ac.cn

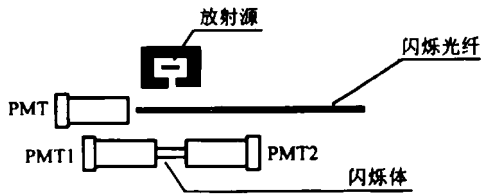


图 1 实验装置示意图

图 2 为读出电子学框图。与通常分别测量幅度(电荷量)或时间特性不同,这套系统立足于记录每个事例的全部信息,在本实验中为光纤输出信号的幅度信息(q)和时间信息(t)两个物理量。触发计数器的两个信号由 PMT1, PMT2 输出经过放大、甄别,进行二重符合后作为好事例判选信号——ADC 的开门信号。读出系统包括幅度(电荷)测量和时间测量两个数据通道。幅度测量通道:闪烁光纤的输出信号由 PMT 输出,经放大、延迟,送入 ADC 进行测量。时间测量通道:两个触发信号中的一个(由 PMT1 输出)经过放大再经过恒比定时甄别器甄别作为 TDC 的起始信号。闪烁光纤的输出信号经放大后再经过恒比定时甄别器,送入 TDC 作为停止信号。ADC 和 TDC 的信息经过 CAMAC 接口连接到微机进行分析。这样,这套测量装置可同时获取每个事例的时间信息(T)和幅度信息(Q)。最后用 PAW-Ntuple^[4] 对每个事例的数据进行分析和统计。分别对美国 Bicro-BCF10 和

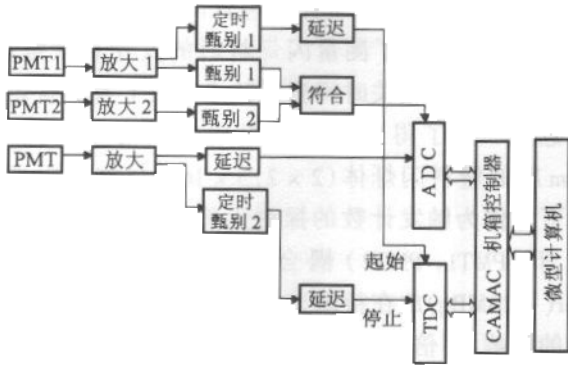


图 2 读出电子学框图

PMT 选用 XP-2020, 放大器为 LeCroy 612A ($\times 10$), 甄别器是 LeCroy 623B, 符合单元是 Philips Model 755, 恒比定时甄别器是 TENNELEC TC454, DELAY 是 ORTEC 425A 延迟盒, ADC 选用 LeCroy 2249W, TDC 选用 LeCroy 2228A, CAMAC 接口是 DSP 6002 型, 微型计算机是 PII 400.

日本 Kuraray-SCSF81 两种闪烁光纤的时间谱进行了测量。

图 3(a)是在此条件下测量到的闪烁光纤输出的幅度分布,它具有明显的单光电子峰。图 3(b)是闪烁光较强时的幅度分布,不仅有单光电子峰,还有双光电子、三光电子峰……。

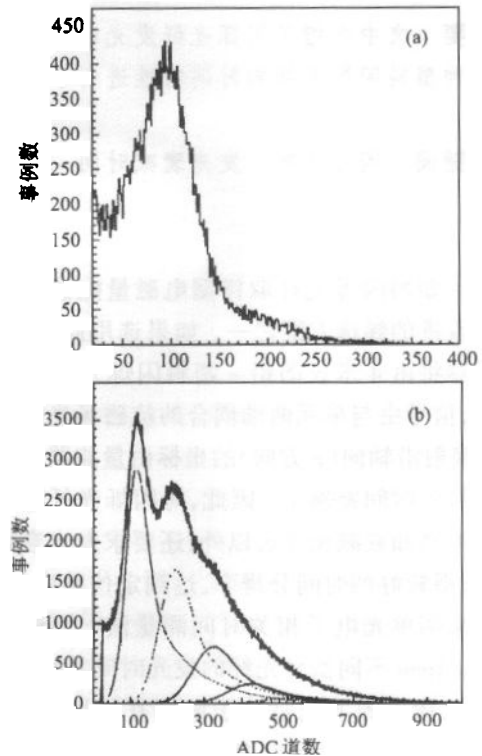


图 3 (a) 单光电子为主的幅度分布; (b) 多光电子幅度分布

图 4 是测量得到的两种光纤的单光电子的时间谱。该分布具有快的上升时间,由闪烁光的上升时间和光电子在倍增管中的渡越时间的涨落共同贡献。时间谱的下降时间有 3 个主要特征:快成分在光发射的前 10ns (图中 600—800 道, TDC: 50ps/道)占主导地位,随后是慢成分和出现在光发射后 ~ 15ns (图中 900—1000 道)处宽的第二个峰(参照图 4(b))。这个时间谱包含闪烁体光的发射谱和测量系统响应两部分的贡献。根据 C. M. Hawkes 等人以及 S. S. Steven 等人的观测^[2,5], 在 ~ 15ns 处的小峰系由倍增管光电子反馈造成的后置脉冲贡献。

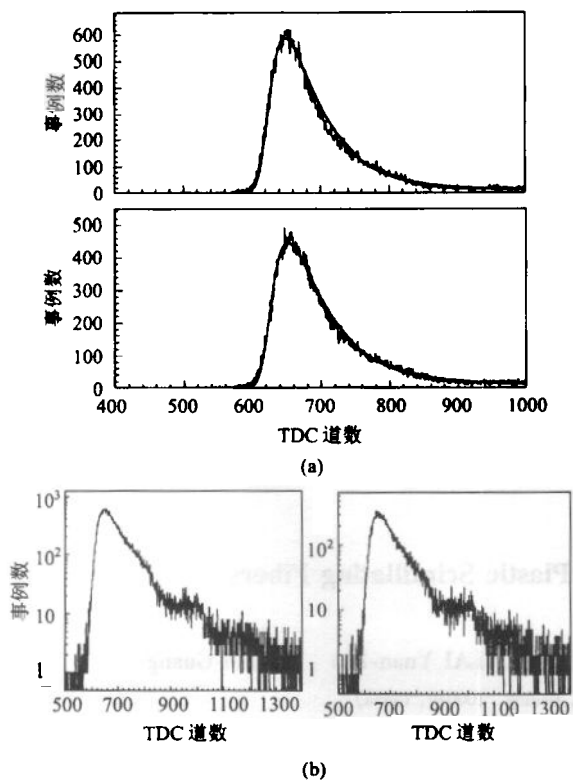


图 4 (a) 单光电子时间谱(上: Kuraray-SCSF81; 下: Bicon-BCF10); (b) 单光电子时间谱(左: Kuraray-SCSF81; 右: Bicon-BCF10. (纵轴为对数标度))

2 测量系统时间响应的标准偏差的确定

切伦科夫光的产生是瞬时的,因而切伦科夫光的时间分布谱反映测量系统本身的时间分辨. 为研究测量系统本身的响应,选用 3.5mm 厚的有机玻璃片替代待测光纤,用 ^{90}Sr 源激发使它产生切伦科夫辐射. 此处选用 3.5mm 厚的有机玻璃片是因为 ^{90}Sr β 源仅能穿透 4mm 厚的有机玻璃. 由于倍增管的时间响应与光入射到光阴极的位置有关,将有机玻璃全部避光仅在面向光电倍增管一面的中心留一个 2mm 直径的小孔与光电倍增管的中心耦合. 此处正是待测闪烁光纤与倍增管光阴极耦合的位置. 图 5

为测到的切伦科夫光的幅度谱和时间谱. 切伦科夫光的时间分布比闪烁光纤的时间分布窄得多,集中在 $\sim 10\text{ns}$ 之内. 通过对切伦科夫时间谱的拟合,可以给出测量系统时间响应的标准偏差.

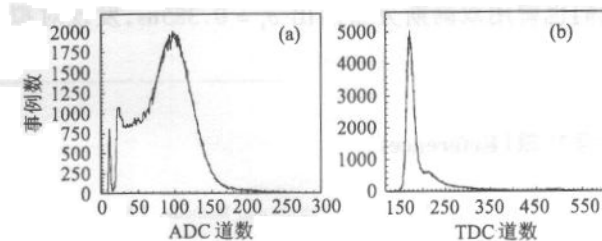


图 5 切伦科夫光的幅度谱(a)和时间谱(b)

3 实验数据分析及结果

实验数据的分析基于假定测量得到的单光电子时间谱是闪烁光的发射谱 $E(t)$ (公式(1))和系统的时间响应的卷积. 设系统的时间响应函数近似为高斯分布,它的标准偏差为 σ_t , C. M. Hawkes 等人^[2]给出了相应的分布函数表达式:

$$P(t) = \int_0^{\infty} E(t') \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_t} e^{-(t-t')^2/2\sigma_t^2} dt' = \frac{1}{1+R} \left[\frac{\tau_2 f(t, \tau_2) - \tau_1 f(t, \tau_1)}{\tau_2 - \tau_1} + R f(t, \tau_3) \right], \quad (2)$$

其中,

$$f(t, \tau) \equiv \int_0^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_t} e^{-(t-t')^2/2\sigma_t^2} \frac{1}{\tau} e^{-t'/\tau} dt' = \frac{1}{2\tau} \left[1 + \operatorname{erf} \left(\frac{1}{\sqrt{2}} \left(\frac{t}{\sigma_t} - \frac{\sigma_t}{\tau} \right) \right) \right] e^{-(t\tau - \sigma_t^2/2\tau^2)} \quad (3)$$

切伦科夫光的时间谱可以近似的用一个高斯分布来拟合,给出测量系统时间响应的标准偏差为: $\sigma_t = 0.424\text{ns}$. 再利用最大似然法对式中的参数: τ_1, τ_2, τ_3 和 R 进行拟合,给出了比较可靠的结果(表 1).

表 1 闪烁光纤发光时间特性

闪烁光纤	快成分的上升时间 τ_1/ns	快成分衰减常数 τ_2/ns	慢成分衰减常数 τ_3/ns	慢成分和快成分的比值 (R)
Kuraray-SCSF81	0.87 ± 0.03	2.63 ± 0.05	13.9 ± 0.4	0.17 ± 0.01
Bicon-BCF10	0.97 ± 0.04	2.69 ± 0.07	14.4 ± 0.3	0.29 ± 0.01

在以上的拟合中,我们专门对系统响应时间做了研究.切伦科夫光的时间谱中包含了不止一个峰,谱中的长尾包含后置脉冲效应,但是它的贡献不大.用一个高斯分布给出 $\sigma_1 = 0.424\text{ns}$ 确实是近似.我们也曾用双高斯分布给出 $\sigma_1 = 0.385\text{ns}$,发现对拟

合结果影响不大,变化在 1% 以内.图 4(a)中光滑实线为拟合后的结果.

由表 1 的结果可见,Kuraray-SCSF81 光纤的慢闪烁成分比较少,而且它的快闪烁成分的上升时间和衰减常数也略小,所以它有更快的时间响应.

参考文献 (References)

- 1 Antonelli A et al. Nuclear Instruments and Methods, 1990, **A354**:352
- 2 Hawkes C M et al. Nuclear Instruments and Methods, 1990, **A292**:329—336
- 3 Papadopoulos L. Nuclear Instruments and Methods, 1997, **A401**:322—328
- 4 CERN Program Library Writeup Q121, PAW (Physics Analysis Workstation), 1992
- 5 Steven S S et al. IEEE Trans. Nucl. Sci., 1972, **NS-19**:356

Emission Time Measurements for Plastic Scintillating Fibers

XIA Xiao-Mi¹⁾ WANG Man FANG Jian ZHOU Li LAI Yuan-Fen LÜ Jun-Guang

(Institute of High Energy Physics, CAS, Beijing 100039, China)

Abstract A time correlated single-photon counting technique of emission time measurement for plastic scintillating fibers is given. The time response of the test system is studied and calibrated with Cherenkov radiations. The emission time properties for two different kinds of plastic scintillating fibers, Kuraray-SCSF81 and Bicro-BCF10, are obtained.

Key words scintillating fiber, light decay time, single photoelectron, Cherenkov radiation

Received 27 September 2002

1) E-mail: xiaxm@mail.ihep.ac.cn