

BESIII端盖TOF探测器的研制

唐泽波¹ 李昕¹ 安少辉¹ 陈宏芳¹ 衡月昆² 李澄^{1;1)} 邵明¹ 孙勇杰¹
王贻芳² 吴冲² 曾晖¹ 赵力¹ 赵小建²

1 (中国科学技术大学近代物理系高能组 合肥 230026)
2 (中国科学院高能物理研究所 北京 100049)

摘要 针对BESIII端盖TOF的研制方案,设计和制作了特殊构型的闪烁探测器.研究了光电倍增管(R5924)和塑料闪烁体(BC404, BC408, EJ204)的性能.测量了几种包装材料对单个闪烁探测器模块光收集和本征时间分辨的影响.使用800MeV实验电子束对探测器模块的测量结果显示,采用EJ204和BC404晶体其时间分辨小于80ps;采用ESR材料包装可获得较大的输出信号,提高了探测器的性能.

关键词 BESIII 飞行时间探测器 时间分辨

1 引言

正在研制中的BESIII端盖飞行时间探测器(简称:ETOF)由2×48个扇形塑料闪烁体探测器构成,距离束流对撞中心1330mm,接受度从0.85到0.95(见图1).用于测量带电粒子在主漂移室内的飞行时间,结合主漂移室测量的粒子动量和径迹,实现一定动量范围内对π/k介子的分辨.要求整个端盖TOF系统的时间分辨达到110ps,包括电子学系统的测量精度,束团时间的长度和时间不确定性,主漂移室的外推定位精度等,其中关键部分是探测器的本征时间分辨,设计要求达到80ps^[1].

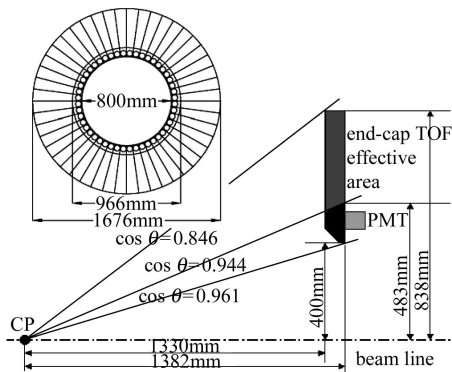


图1 BESIII端盖飞行时间探测器结构

通常闪烁探测器本征时间分辨 σ_{TOF} 与闪烁体和光电倍增管参数之间的关系可用下面的关系式表示^[2]

$$\sigma_{TOF} = \sqrt{\left(\frac{1}{2.35}\right)^2 \frac{\tau_{scin}^2 + \left[\frac{n(n-1)L}{2c}\right]^2 + \tau_{PMT}^2}{N_{pe}} + \sigma_e^2}$$

式中 τ_{scin} 是闪烁体的发光衰减时间, n 是闪烁体的折射率, L 是粒子击中位置到PMT的距离, τ_{PMT} 表示PMT中光电子的渡越时间涨落, N_{pe} 表示收集到的光电子数, σ_e 表示电子学时间分辨.显然,在闪烁体和PMT基本性能确定的条件下,如何提高荧光收集效率(即增加光电子数)是提高探测器时间分辨的关键.它不仅与闪烁体的荧光特性,光衰减长度,PMT量子效率有关,而且与闪烁体的几何形状,包裹材料,以及粒子击中探测器的位置相关.图2是根据ETOF探测器设计方案,闪烁体(型号BC404)的荧光收集效率随电子(能量1.5GeV)击中位置变化的模拟结果.为了能够获得最佳的性能参数,从2003年开始对探测器进行设计和研究,针对ETOF闪烁体特殊几何形状和光电倍增管的特性开展了多方面的模拟和实验研究^[3, 4],通过改善探测器的荧光传输效率和PMT的时间性能,有效地提高了探测器的时间分辨性能.

2005 - 07 - 27 收稿, 2005 - 11 - 21 收修改稿
1) E-mail: licheng@ustc.edu.cn

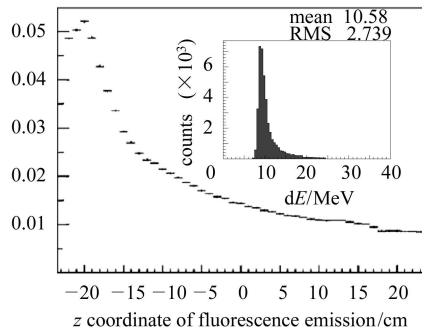


图2 闪烁体荧光传输效率随电子击中位置变化的模拟结果

模拟条件为: BC404闪烁体, 厚度50mm, 表面不加任何光反射层。右上角图表示: 1.5GeV的电子在闪烁体中的能量沉积。

2 R5924 PMT 性能

根据BESIII-ETOF设计方案, 探测器计划使用fine-mash光电倍增管(型号: R5924), 它的主要特点是体积较小, 具有良好的时间性能, 工作在1T磁场下增益可达到 2.5×10^5 。依据Hamamatsu公司提供该PMT基本的设计参数, 考虑到在端盖附近BEPC II背景辐射可达到 10^4 Hz, 如要求工作的增益稳定达到 $<1\%$, 其工作电流要达到 >0.1 mA。根据这一基本要求, 我们设计了多种PMT分压电路, 研究了有关的测量方法和测量装置。在此基础上完成了R5924 PMT各方面的性能测试, 包括PMT倍增系数(见图3), 磁场下的增益(见图4), 电子渡越时间涨落(见图5), PMT工作电压对内部温度影响(见图6)等。图7

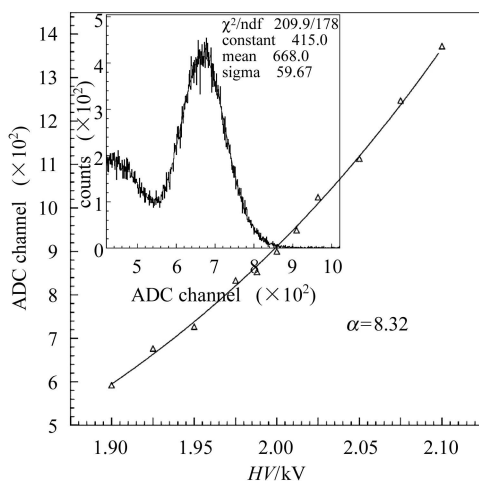


图3 R5924增益随高压的变化

倍增系数 $\alpha=8.32$ 。图中左上角为幅度谱。测量条件: 采用 ^{137}Cs 放射源和CsI晶体。通过与光电倍增管热发射产生的单电子峰比较得到其绝对增益为 1.45×10^7 。

是R5924 PMT的输出信号形状, 其脉冲上升时间和宽度达到ETOF对时间测量的设计要求。

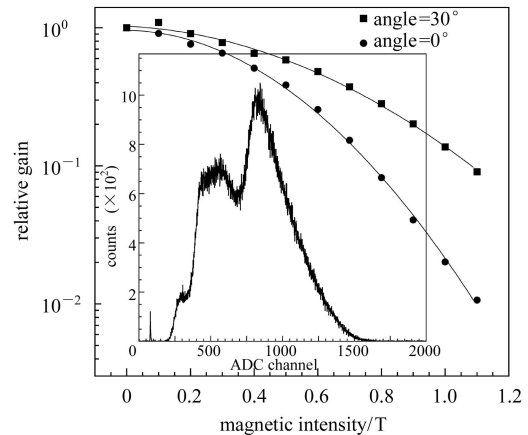


图4 R5924增益随磁场强度的变化

图中左下角为幅度谱。测量条件: LSO晶体(自身含有放射性元素 ^{176}Lu 并伴随 β - γ 级联辐射)。R5924工作电压/电流: 2000V/0.29mA。

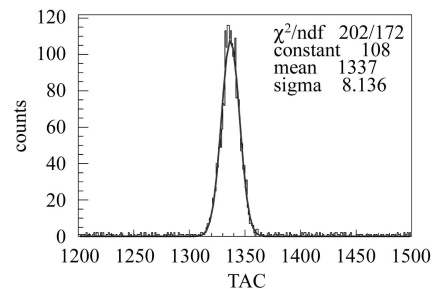


图5 R5924渡越时间涨落分布

$FWHM = 8.136 \times 25\text{ps} \times 2.354$, 扣除电子学系统涨落后 $FWHM = 460\text{ps}$ 。测量方法: 采用CHERENKOV单光子方法^[5]。R5924工作电压/电流: 2000V/0.29mA。

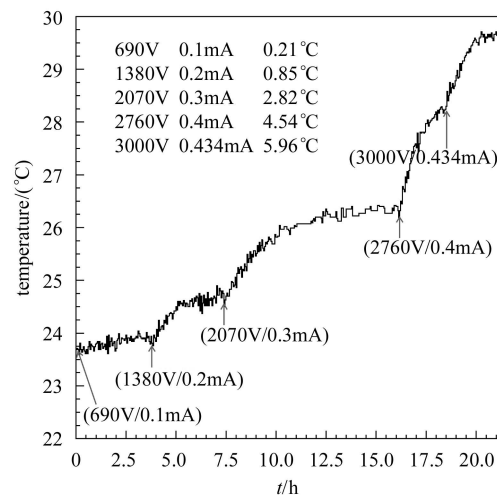


图6 R5924工作电压对其内部温度的影响

图中标注温度=稳定时测量温度-室温(23.7°C)。

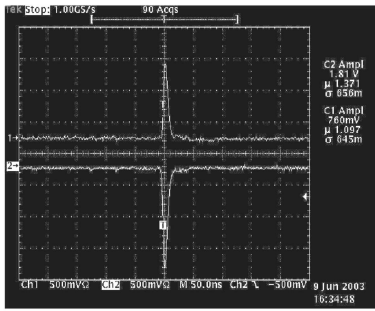


图 7 R5924 阳极和打拿极输出脉冲形状: 脉冲上升时间 <math>< 1.5\text{ns}</math>
 测量条件: 宇宙线 μ 子穿过 2.5cm 厚闪烁体. R5924 工作条件: 工作电压/电流为 2000V/0.29mA.

3 探测器的性能

BESIII 端盖 TOF 研制方案中待定的一个主要问题是确定合适塑料闪烁体. 表 1 给出了高能物理实验中常用 3 种的闪烁体 (BC404, BC408, EJ204) 基本性能参数. 对于这 3 种闪烁体由于发射谱分布略有不同, 对应与 R5924 光谱响应有一定的差别, 两者卷积的结果其平均量子效率分别为 0.224 (BC404), 0.220 (EJ204) 和 0.212 (BC408). 由于 ETOF 闪烁体模块特殊的几何形状, 其荧光传输效率随粒子击中位置变化较大, 因此要获得较好时间分辨主要是提高 PMT 远端的光收集效率. 模拟结果显示 (见图 8) 对于同一种包装 (Tyvek 纸), BC404 和 EJ204 晶体的光输出信号比 BC408 要大 10%. 有关的模拟方法可参阅文献 [3].

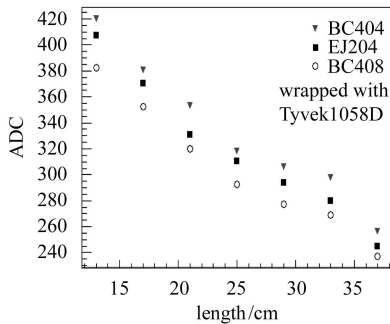


图 8 3 种塑料闪烁体输出信号幅度随电子击中位置的变化 (模拟结果)

表 1 3 种闪烁体 (BC404, BC408, EJ204) 性能参数

	BC404	BC408	EJ204
光输出, % 蒽晶体	68	64	68
上升时间/ns	0.7	0.9	0.7
衰减时间/ns	1.8	2.1	1.8
脉冲宽度, $FWHM$ /ns	2.2	~2.5	2.2
光衰减长度/cm	140	210	160
发射波长峰位/nm	408	425	408
生产厂家	BICRON	BICRON	EJEN

4 束流测试结果

在上述研究的基础上, 使用 800MeV 试验电子束对对工作在不同条件下的 TOF 模块的性能进行测试 [4]. 考虑到 PMT 实际工作在 1T 磁场下, 实验时对 PMT 输出信号衰减了 32dB. 测试中先后使用了 3 种包装材料: 铝箔, Tyvek 包装纸和增强镜面光反射薄膜 (简称 ESR, 光反射率 98.5%), 其中 Tyvek 纸对荧光传输作用主要是漫反射, 铝箔和 ESR 主要是镜反射. 实验结果显示对于同一种晶体 (BC404), 3 种包装材料的探测器时间分辨虽然相近 (见图 9), 但使用 ESR-M204 包装材料, 测量的输出信号幅度比其他包装材料要大 20% 以上 (见图 10). 图 11 给出了对 3 种闪烁体的时间

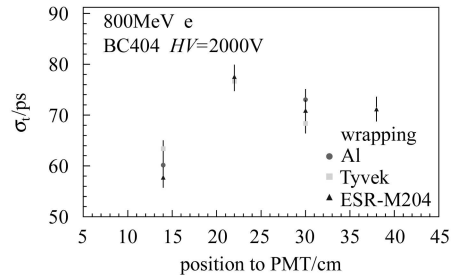


图 9 BC404 闪烁体使用 3 种不同包装材料的探测器时间分辨

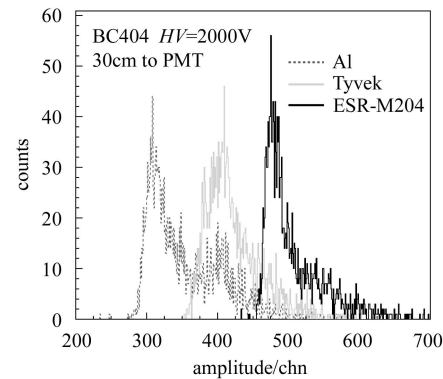


图 10 BC404 闪烁体使用 3 种不同包装材料的探测器输出信号幅度

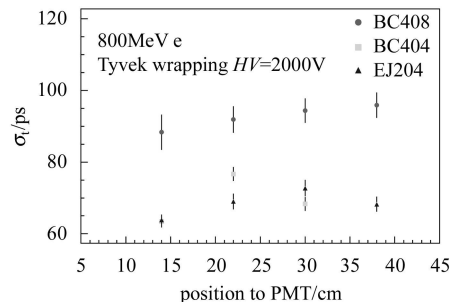


图 11 使用 3 种闪烁体的探测器时间分辨

分辨测量结果比较. BC404和EJ204性能很接近, 均在80ps以下; BC408的时间分辨较差, 在各个击中位置均大于80ps.

5 结论

实验结果显示: 1) 研制的PMT R5924的各项性能指标可以满足ETOF设计要求. 考虑到PMT在1T磁场下其增益有较大的下降, 在实际运行中需要对输出信号进行适当的放大; 2) tyvek纸和ESR包装材料对时间性能的影响相近, 但ESR能有效的提高荧光收集效率, 增大输出信号幅度, 对同一晶体其输出信号幅度比另外两种包装材料大20%, 从而能够降低光电倍增管工作电压, 提高光电倍增管工作稳定性, 延长光电倍增管寿命; 3) 闪烁体BC404与EJ204光输出信号比BC408大10%, 在不同击中位置时间分辨均小于

80ps, 适合用于BESIII-ETOF. BC404与EJ204性能相近, 但EJ204性价比更高. 图12给出了使用ESR包装的探测器时间分辨的束流测量和模拟结果, 其中测量结果包括电子学晃动(30ps)和电子束击中位置误差的影响. 与模拟结果比较, 两者变化趋势基本一致.

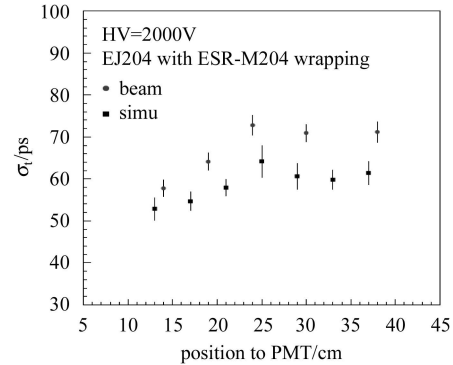


图12 使用ESR包装的EJ204探测器时间分辨

参考文献(References)

- BESIII Collaboration. BEPCII 初步设计, IHEP-BEPC II-SB-03-4
- CHENG Chi-Peng, ZHENG Hong-Wei. NIM, 1986, **A252**: 67—74
- LI Xin, WU Chong, AN Shao-Hui et al. HEP & NP, 2005, **29**(6): 586 (in Chinese)
(李昕, 吴冲, 安少辉等. 高能物理与核物理, 2005, **29**(6): 586)
- AN Shao-Hui, LI Xin, CHEN Hong-Fang et al. HEP & NP, 2005, **29**(8): 775—780 (in Chinese)
(安少辉, 李昕, 陈宏芳等. 高能物理与核物理, 2005, **29**(8): 775—780)
- WANG Qing-Qing. Accurate Measurement of the PMT's TTS. The Thesis of Bachelor Degree of USTC, 2005 (in Chinese)
(王庆庆. PMT 渡越时间的精密测量. 中国科学技术大学学士学位论文, 2005)

R&D of the Endcap TOF Detector for BESIII

TANG Ze-Bo¹ LI Xin¹ AN Shao-Hui¹ CHEN Hong-Fang¹ HENG Yue-Kun² LI Cheng^{1;1)}
 SHAO Ming¹ SUN Yong-Jie¹ WANG Yi-Fang² WU Chong²
 ZENG Hui¹ ZHAO Li¹ ZHAO Xiao-Jian²

¹ (Department of Modern Physics, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

² (Institute of High Energy Physics, Beijing 100049, China)

Abstract The Endcap TOF (ETOF) of Beijing Spectrometer(BESIII) is consisted of 2×48 pieces of trapezoidal scintillator. Its main physics goal is to realize $2\sigma \pi/k$ separation at momentum up to $0.8\text{GeV}/c$, and to reach the intrinsic time resolution of 80ps. In this paper, the properties of photomultiplier tube(R5924) and plastic scintillators (BC404, BC408, EJ204) are studied, a ETOF module with different wrappings is tested with the beam of 800MeV electron at IHEP. The results show that the time resolution of an ETOF module using scintillator BC404 or EJ204 is below 80ps which includes the electronic fluctuation. The ESR wrapping can efficiently enhance the amplitude of the output pulse and improve the performance of the TOF detector.

Key words BESIII, time of flight(TOF), intrinsic time resolution

Received 27 July 2005, Revised 21 November 2005

1) E-mail: licheng@ustc.edu.cn