

强磁场下精细网型光电倍增管的性能测试

石峰¹⁾ 薛生田 衡月昆 赵小健
舒乐 吴元明 李家才 吴金杰 孙志嘉
(中国科学院高能物理研究所 北京 100039)

摘要 北京谱仪升级后(BESⅢ)的飞行时间计数器(TOF)将使用精细网型光电倍增管(PMT).本工作对日本滨松(Hamamatsu)公司生产的精细网型光电倍增管 R5924(FM)的性能在强磁场下进行了测试.测量了 PMT 在顺、逆磁场方向时相对增益随磁场强度的变化,在 1T 时,与 0 磁场相比,相对增益下降约 50 余倍.测量了不同磁场强度(0,0.5,1T)下,PMT 的相对增益随工作电压的变化,在相当宽的工作电压范围内,相对增益随工作电压的变化具有指数关系.通过不同磁场强度下 PMT 相对增益随工作电压变化趋势的比较,表明 PMT 打拿极精细网型的特殊构造使二次电子发射系数 δ 中的因子 k 小于一般值,且随磁场强度的增强而变小,这是造成强磁场下 PMT 增益下降的重要原因.

关键词 光电倍增管(PMT) 相对增益 二次电子发射系数 磁场强度

1 引言

BESⅢ-TOF 的 PMT 将在 1T 的强磁场下工作.目前选定的 PMT 为日本滨松(Hamamatsu)公司生产的精细网型(Fine-Mesh)光电倍增管 R5924(FM)¹⁾.研究该 PMT 在强磁场下的性能对于 PMT 的选择、工作电压的设置及后接前置放大器放大倍数的选取均具有重要参考价值.

2 实验装置和读出电子学

用于本实验的强磁场是一台经过改装的清扫磁铁提供的,上下磁极头直径为 30cm,磁极头间隙为 18.5cm.在 220A 励磁电流下,磁场强度可达 1.09T,从磁极面中心到边缘磁场变化约为 3%.实验装置和读出电子学框图如图 1 所示.

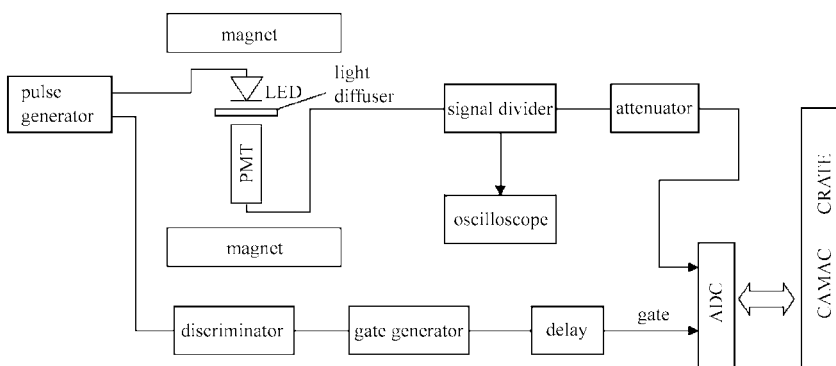


图 1 实验装置和读出电子学

2004-01-16 收稿,2004-03-17 收修改稿

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

测试光源采用发光二极管(LED)作脉冲光源(型号 NSPB500S,日本 NICHIA 公司生产)^[2],LED 发光波段与光电倍增管(R5924)光阴极敏感波长范围相匹配,如图 2 所示.LED 由方波脉冲驱动,具有较好的工作稳定性,出厂指标为一百小时连续工作输出光强变化小于 5%,实测半小时工作稳定性好于 2%.PMT 输出信号经衰减器衰减后连接到模数转换器 ADC(LeCroy 2249A)的输入端,LED 的驱动脉冲信号经过甄别器、门产生器和延迟器后作为 ADC 的门信号.数字化的数据经 CAMAC 总线由计算机读出并处理.

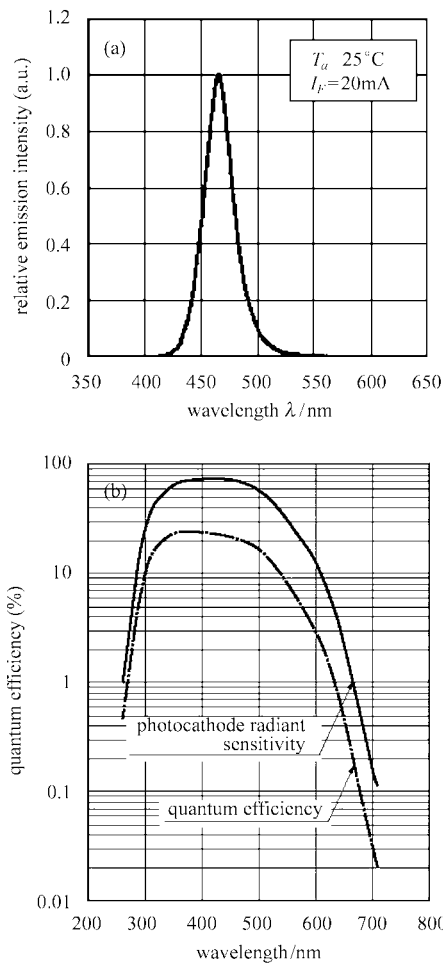


图 2 (a)LED(NSPB500S)发射光谱;(b)PMT(R5924)频谱响应

当 LED 的驱动脉冲不变时,测得 ADC 谱是比较理想的高斯分布,分辨率约为 5%.光电倍增管输出信号波形及 ADC 脉冲幅度谱,如图 3 所示.本实验由于 ADC 最大门宽限制,LED 驱动脉冲宽度选为 400ns.实验表明:LED 输出光强涨落受驱动脉冲宽度影响显著,当驱动脉冲宽度选在微秒级时,可以获得更好的脉冲幅度分辨率.

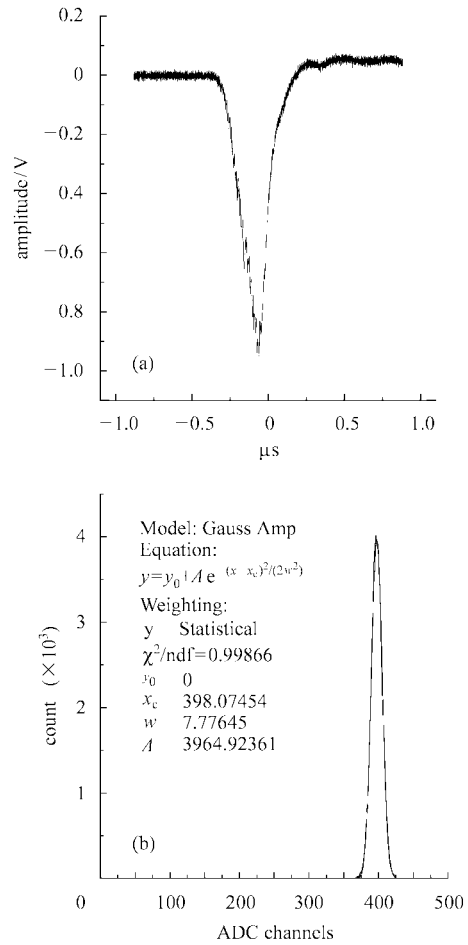


图 3 (a)R5924 输出信号波形;(b)ADC 脉冲幅度谱

3 PMT 的相对增益随磁场强度的变化

PMT 工作电压选定在 2000V 情况下,测量在顺、逆磁场方向(磁场方向与 PMT 轴线方向平行,光阴极朝向 N 极为 0° 、朝向 S 极为 180°)PMT 的相对增益随磁场强度的变化,如图 4 所示.在相对低磁场时(低于 0.4T),PMT 的相对增益下降不大(约 2 倍);高于 0.4T 时,相对增益开始有较大变化.在 1T 时,与 0 磁场相比,相对增益下降约 50 余倍.这与 Hamamatsu 公司技术手册中给出的结果是一致的^[1],并且表明在顺、逆磁场方向,相对增益随磁场强度的变化规律基本一致.

4 PMT 的相对增益随工作电压的变化

在几种不同的磁场强度(0, 0.5, 1T)下,测量 PMT 的相对增益随工作电压的变化,如图 5 所示.对 0 磁场的情况,在 2000V 以下,相对增益随工作电压

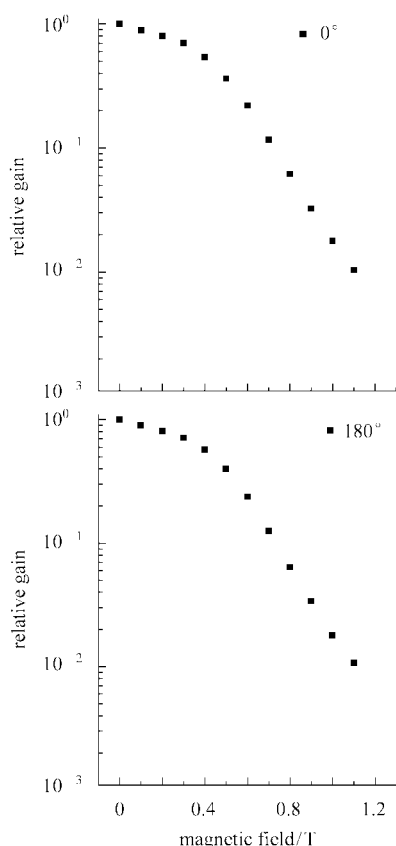


图 4 PMT 相对增益随磁场强度变化曲线($0^\circ, 180^\circ$)

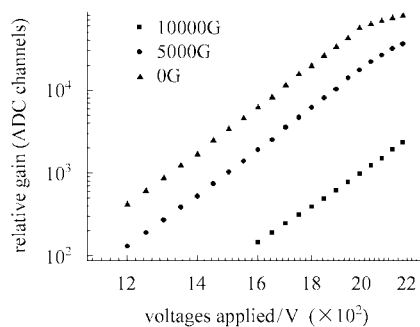


图 5 不同磁场下(0,0.5,1T)PMT 相对增益随工作高压变化曲线(双对数)

的变化保持了较好的指数关系(双对数坐标中的直线关系),在 2000V 以上,出现了明显的饱和趋势.在 0.5T 磁场情况下,一直到 2100V,相对增益随工作电压的变化基本上保持了较好指数关系,只是在高端,曲线稍有下降、偏离指数上升的趋势.在 1T 磁场情况下,由于 PMT 增益的下降,在整个测量范围内相对增益随工作电压的增加保持了很好的指数上升关系.这表明为了在强磁场下得到较大的增益, PMT 可选取在较高的电压工作,而不会出现增益饱和现象.

象.

本实验中为了获得较好的信噪比,使 LED 发光较强,明显强于普通闪烁体发光强度,这是 PMT 在高电压下出现增益饱和的主要原因.因此,本实验结果并不意味着 R5924 PMT 应用于 BES III-TOF 探测器时,工作电压只能选取在 2000V 以下(最高工作电压厂家指标:2300V).但过高的工作电压对 PMT 的寿命不利,实际工作电压的确定,应兼顾 PMT 的增益和寿命两方面因素综合考虑.

在整个测量过程中 LED 驱动脉冲信号幅度保持不变,但由于在磁场下 PMT 输出信号幅度变化很大,远远超出 ADC 的有效动态范围,故对较大的输出信号采用高质量的衰减器(WAVETEK 5080)进行衰减.测试完成后通过以真实信号脉冲对衰减器的不同衰减档进行刻度,求出各衰减档的衰减倍数,反推出 PMT 输出信号的真实幅度.值得注意的是,由于衰减器的频率响应特性,对不同脉冲形状的输入信号,衰减器同一衰减档的衰减倍数是不同的,因此在实验中以真实信号对衰减器进行刻度十分必要.

5 结果讨论

由图 5 不难看出,不同的磁场强度(0,0.5,1T)下 PMT 的相对增益随工作电压变化的斜率是有差别的,现分析如下:

众所周知, PMT 的增益是与打拿极的收集效率、二次电子发射系数和打拿极级数密切相关^[3].

通常,把由光阴极发射的光电子中入射到第一打拿极有效部分的光电子几率称为打拿极的收集效率(α).虽然在第二打拿极及以后各极也存在未被有效收集的二次电子,但因为到达后级的电子数增加了,故对收集效率的影响不大.因此,通常只考虑第一打拿极的光电子收集效率(α).

电子流从第一打拿极到第二打拿极,一级接一级,直到第 n 打拿极连续倍增.每一级发射出的二次电子流与入射电子流之比即为该级的二次电子发射系数(δ).故阳极电流(I_a)和阴极电流(I_c)的关系及电流增益(μ)可由下式给出:

$$I_a = I_c \cdot \alpha \cdot \delta_1 \cdot \delta_2 \cdots \delta_n, \quad (1)$$

及

$$\mu = \frac{I_a}{I_c} = \alpha \cdot \delta_1 \cdot \delta_2 \cdots \delta_n. \quad (2)$$

其中的二次电子发射系数 δ 是打拿极极间电压(E)的函数,可由下式表示:

$$\delta = a \cdot E^k, \quad (3)$$

在零磁场下 a 是常数, k 是由电极的构造和材料决定的系数,一般在 0.7—0.8 之间.于是, PMT 打拿极数为 n ,各极间均分压时,电流增益 μ 为

$$\mu = \alpha (aE^k)^n = \alpha a^n E^{kn}. \quad (4)$$

针对测试 PMT(Hamamatsu R5924(FM), $n = 19$)的分压器设计具体情况,第一打拿极 1.89 倍分压,其余打拿极均分压,设 V 为 PMT 外加的工作电压,则有:

$$\mu = \alpha a^n \left(\frac{1.89}{n + 1.89} V \right)^k \left(\left(\frac{1}{n + 1.89} V \right)^k \right)^{n-1} = P_1 (0.0495 V)^{P_2}, \quad (5)$$

其中 $P_1 = \alpha a^{19}$, $P_2 = 19k$.

以上述函数形式对不同磁场强度下相对增益 - 工作电压曲线进行拟合(如图 6),对 0G 曲线: $P_1 = 3.345 \times 10^{-15}$, $P_2 = 9.627$; 对 10000G 曲线: $P_1 = 7.269 \times 10^{-15}$, $P_2 = 8.584$,由此得到 $k = 0.507(0G)$ 和 $k = 0.452(10000G)$.这表明:对于精细网型 PMT,即便在 0G 时,二次电子发射系数 δ 中的因子 k 也小于一般值(0.7—0.8),这是由打拿极的精细网型特殊构造决定的.此外,因子 k 随磁场强度的增强而变小,表明 k 除了主要由打拿极的构造和材料决定外,还受到外加磁场强度和方向的影响(本实验只研究了外加磁场方向与光电倍增管轴线方向平行的情况).对照以上公式(3)不难发现:因子 k 的变化造成打拿极二次电子发射系数 δ 下降,是在强磁场条件下光电倍增管增益下降的重要原因.

应当指出,二次电子产生和发射是与二次电子动量、二次电子空间电荷密度、打拿极结构和材料等诸多因素有关的复杂过程,而磁场对二次电子产生、发射过程影响的机理及对各打拿极影响的差异也相当复杂.因此,定量描述磁场对二次电子发射系数的影响并非易事.公式(3)是零磁场条件下二次电子发射系数遵守的经验公式,本文假定公式(3)在强磁场条件下依然成立,并以此为基础探讨磁场对二次电子发射系数的影响.1T 下 PMT 相对增益 - 工作电压曲线的拟合结果,拟合优度因子(χ^2)的数值在合理范围内(如图 6),表明在当前实验精度下这种假设是近似成立的.

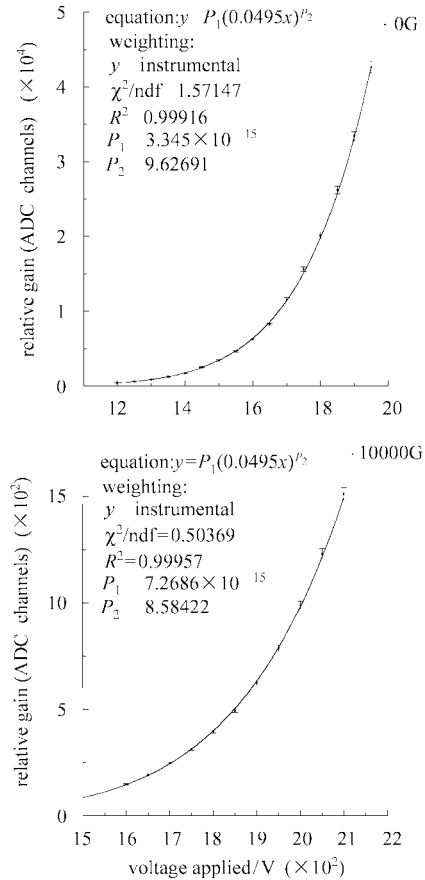


图 6 不同磁场下(0,1T)PMT 相对增益随工作高压变化拟合曲线

6 结论

实验结果表明,目前选定的日本 Hamamatsu 公司生产的 PMT-R5924(FM)可以在强磁场下工作.但正如事先所预期的那样,在 1T 磁场情况下, PMT 相对增益将有较大的下降(约 50 余倍).这就为 PMT 工作电压的设置及后接前置放大器放大倍数的确定提供了必要的信息.实验结果分析表明,打拿极二次电子发射系数 δ 中因子 k 随磁场增强而变小,是强磁场条件下光电倍增管增益下降的重要原因.这为探讨磁场对光电倍增管增益影响的机理提供了参考信息.至于强磁场下 PMT 有关时间性能(如 PMT 渡越时间离散 TTS)的测量,则要求具备好的时间性能的光源,目前的 LED 还不能满足需要.这是下一步强磁场下 PMT 时间性能测试实验必须考虑的.

参考文献 (References)

- 1 Hamamatsu Photonics K K. Photomultiplier Tube(R5924) Data Sheet:
http://www.hpk.co.jp/Eng/products/ETD/pdf/R5924_TPMH_1135_E02.pdf
- 2 Nichia Corporation. Specification for Nichia Blue LED (NSPB500S):
http://www.nichia.co.jp/specification/led_lamp/NSPB500S.pdf
- 3 Hamamatsu Photonics K K. Editors Committee. Photomultiplier Tube – Foundation and Applications. Shizuoka, Japan: Institute of Digital Publication, Hamamatsu K. K., 1995. 18–58 (in Chinese)
(浜松光子学株式会社编辑委员会. 光电倍增管——基础及其应用. 日本静岡:株式会社数字出版印刷研究所, 1995. 18–58)

Performance Test of Fine-Mesh PMT in Strong Magnetic Field

SHI Feng¹⁾ XUE Sheng-Tian HENG Yue-Kun ZHAO Xiao-Jian
SHU Le WU Yuan-Ming LI Jia-Cai WU Jin-Jie SUN Zhi-Jia
(Institute of High Energy Physics, CAS, Beijing 100039, China)

Abstract The performance of a fine-mesh photomultiplier tube (PMT)—Hamamatsu R5924(FM) to be used for the time-of-flight (TOF) counter in the upgraded Beijing Spectrometer (BESⅢ) was investigated in a strong magnetic field up to 1T. The dependence of the PMT relative gain on the magnetic field intensity at both 0° and 180° directions were measured. It was found that the relative gain of the PMT is reduced by a factor of 50 or more at 1T magnetic field compared with no field case. The relative gain of the PMT vs. the working voltage at different magnetic field intensities (0, 0.5, 1T) were also measured. An exponential dependence of the relative gain on the working voltage was observed for a wide range of the working voltage. Moreover, the factor k in the secondary electron emission ratio δ is measured to be less than the nominal value due to the special fine-mesh structure of PMT's dynodes and it decreases with the increasing magnetic field intensities. It is the important reason that the gain of PMT decreases in case of strong magnetic field existence.

Key words photomultiplier tube(PMT), relative gain, secondary electron emission ratio, magnetic field intensity