

基于大功率LED的中子墙光刻度系统*

余玉洪^{1,2;1)} 徐华根¹ 詹文龙¹ 徐珊珊¹ 苏弘¹ 李小刚¹ 孙志宇¹ 肖志刚¹
胡正国¹ 郭忠言¹ 王建松¹ 陈若富^{1,2} 樊瑞睿^{1,2} 郑川^{1,2}

1 (中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

2 (中国科学院研究生院 北京 100049)

摘要 光刻度系统是中子墙探测器系统的重要组成部分,用于中子墙前端电子学的刻度和探测器工作性能变化的监测.通过对基于发光二极管(LED)作为光源的中子墙光刻度系统方案开展了细致的测试研究,确定了基于快脉冲驱动的大功率蓝光LED(3W)的中子墙光刻度系统方案,对中子墙探测单元进行了初步刻度测试,刻度结果能很好地满足光刻度要求,表明对于快塑料闪烁体探测器该方案是一种较为理想的方案.

关键词 HIRFL-CSR RIBLL II 中子墙 LED光刻度系统

1 引言

放射性核束(RNB)的使用,为研究大量远离 β 稳定线的奇异核素带来了可能,为此,国际上各大重离子核物理实验室都相继建造了各具特色的放射性束流研究装置^[1-4].中国科学院近代物理研究所于1997年在兰州重离子加速器(HIRFL)上成功建成了国内第一条工作在费米能区的弹核碎裂(PF)型重离子放射性束流产生装置——兰州放射性束流线(RIBLL)^[5, 6],其初级束是由HIRFL系统的分离扇回旋加速器(SSC)提供的单核子能量在几十到100MeV的重离子束.在建的HIRFL冷却储存环(CSR)系统中,主环(CSRm)和实验环(CSRre)之间又正在建造一条利用CSRm提供的单核子能量可高达1GeV的重离子束弹核碎裂和靶核碎裂机制产生放射性束的第二条放射性束流线RIBLL II.在RIBLL II中间处可引出单核子能量为几百MeV到约1GeV的稳定束流和放射性束流输运到CSRm的外靶实验区,用以开展放射性束物理和核物质状态方程等的研究.

中子墙是CSRm外靶实验装置中关键设备之一,该设备利用快塑料闪烁体作为探测介质,通过飞行时间技术实现对能量为100MeV—1GeV中子的探测^[7].

光刻度系统作为中子墙探测器的必要配套设备作用有二,一是对中子墙单元读出的前端电子学进行刻度,二是对中子墙单元的稳定性进行监测.因此,光刻度系统首先必须能够模拟中子墙闪烁体中的闪烁光信号,同时还必须具备长期工作的稳定性.另外,光刻度系统的造价不能太高.基于以上要求,我们从光源以及光刻度系统的几种备选方案中,确定了高性能价格比的快脉冲驱动下的大功率LED作为光源的中子墙光刻度系统的方案.测试结果表明该方案完全满足中子墙光刻度系统的要求,为中子墙探测器系统的刻度与监测提供了保证.

2 中子墙探测器

作为CSRm外靶实验终端关键的探测设备之一,基于物理实验的要求,中子墙需要对中子有高的探测效率(>90%,对1GeV)和好的能量分辨($\delta E/E < 5\%$).为保证对100MeV—1GeV能区的中子均有高的探测效率,中子墙被设计为纯的闪烁体单元层和取样量能器单元层组成的联合构型.为得到好的能量分辨,我们选用了飞行时间技术,同时为减小中子飞行距离的误差将中子墙进行了模块化设计.闪烁体材料选

2006-09-29 收稿

* 国家重大科学工程HIRFL-CSR冷却储存环资助

1) E-mail: yuyuhong@impcas.ac.cn

用了BICRON公司生产的快塑料闪烁体BC408. 基于Geant4程序包, 我们对中子墙进行了优化设计, 确定了中子墙及其单元模块的尺寸. 主体构型尺寸为1500mm(长)×1500mm(宽)×1000mm(厚), 由14层组成, 每层18个单元. 前两层由纯闪烁体单元组成, 单元尺寸为1440mm×80mm×80mm; 后12层由取样型量能器单元组成, 单元尺寸为1500mm×80mm×70mm, 其为“夹心”构型, 由5层10mm厚的闪烁体单元和4层4mm厚的钢板及2层2mm厚的钢板(最外两层)相间组成. 在此构型下, 中子墙对100MeV和1GeV中子的探测效率分别可达约70%和90%以上, 能量分辨好于5%, 同时也保证了中子墙有好的角分辨和较高的承受多重性的能力^[8]. 为保证中子墙模块单元拥有好的本征性能, 对单元模块及其组件的选型进行了详细的研究, 确定了单元模块采用两端读出的方式, 光导材料选用高透光率的航空有机玻璃, 信号读出光倍管采用日本滨松公司的R7724, 采用时间型分压器以及性能与CAEN高压电源可比拟的高压模块组件. 另外, 在中子墙的机械设计中解决了单元模块的组装工艺和机械承重等问题, 以确保中子墙组装的精度和长期工作的稳定性. 图1是中子墙机械设计结构示意图, 单元模块包括了单元本身和两端光导.

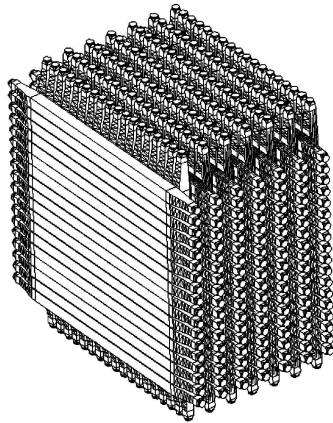


图1 中子墙机械设计结构示意图

3 光刻度系统设计方案

中子墙单元采用两端读出方式, 不仅可以得到飞行时间信息, 还可以通过两端信号的时间差得到入射中子的位置信息(约5cm). 由于单元两端信号的后续电子学的延迟不易保证完全一样, 要得到时间零点以及入射中子的位置点, 需要对所有探测器单元进行刻度, 而探测器各单元的性能也需要进行长期跟踪监测. 此外, 光刻度系统还可对光倍管稳定性进行监测, 对

高压调试、器件更换标定提供依据. 因此, 光刻度系统是中子墙探测器不可或缺的一部分.

3.1 光源的选择

对中子墙光刻度系统而言, 光源的选择至关重要. 光源的稳定性、均匀性、响应速度以及其光波长范围是光刻度系统达到设计目标的关键.

中子墙探测器探测介质材料所选用的是有机塑料闪烁体BC408, 其最可几波长为425nm, 发光衰减时间常数为2.1ns^[9]. 基于此类探测介质材料的特性, 考虑到激光具有好的稳定性、好的单色性、好的方向性等特性, 蓝色激光器是光刻度系统中最为适用的光源之一^[10, 11]. 但由于造价高, 我们没有选择蓝色激光器作为中子墙光刻度系统的光源. 蓝色激光二极管(LED)也是一种选择, 但由于市场上现有的蓝色激光LED造价高且性能不够稳定, 因此也被排除在外. 剩下一种选择就是蓝色LED.

LED是少数载流子在p-n结区的注入与复合而产生发光的一种半导体光源, 也称注入式场致发光光源. 当p-n结两端加上正向偏压, 在外电场作用下, p区的空穴和n区的电子就向对方扩散运动, 构成少数载流子的注入, 从而在p-n结附近产生导带电子和价带空穴的复合, 每一次复合, 将以热能和光能, 或部分热能和部分光能的形式将复合能量辐射出来. 而辐射出来的光, 将以一定频率向外发散^[12]. 其发光机理决定了半导体器件LED具有性能稳定、寿命长、单色性好和发光响应速度快(10^{-7} — 10^{-9} s)等特点. 此外, LED价格便宜, 易于购买. 最终我们选择了蓝色发光LED作为中子墙光刻度系统的光源. 利用LED作为光源, 中子墙的光刻度系统有两种备选方案: 其一是在每个中子墙单元两端的光导上分别固定耦合一个小功率LED作为刻度光源, LED发出的蓝光传播到单元另外一端由光倍管读出, 以达到刻度电子学和监测单元工作状态的目的; 其二是选择大功率的LED作为独立光源, 采用细的光纤将光源发出的光传输至单元两端的光导, 完成刻度工作. 为此, 分别选择了中宙公司提供的小功率平头无帽沿系列蓝光LED和3W大功率蓝光LED进行了测试, 在3.3和3.4两节中将分别介绍这两种方案的测试结果.

3.2 快脉冲驱动电路

采用蓝光LED作为中子墙光刻度系统的光源, 必须对其是否能满足中子墙光刻度的需要进行测试, 检验LED发出的蓝光信号是否能模拟真实事件在闪烁体材料中的荧光信号以及其工作的稳定性. 基于

BC408材料的发光特性,要模拟其所产生的荧光信号,即要求蓝光LED所发出光信号经光电倍增管(PMT)两端读出时,信号上升时间 $t_r < 10\text{ns}$,后延衰减时间 $t_d < 30\text{ns}$ 。这就决定了LED必须工作在快脉冲驱动方式下。为此,设计了专门的快脉冲驱动电路,实现以ns量级的大功率快脉冲来驱动大功率的LED。图2给出了快脉冲驱动电路的原理框图。该电路主要由内置信号产生电路(包括信号发生和频率控制电路)、外置输入信号电平转换电路、脉宽成形电路、驱动电路、输出高速电流开关电路等组成。内置信号的频率可以根据实验需求进行设置,分别为100Hz和50Hz。大功率LED驱动信号的脉冲宽度可通过脉宽成形电路进行选择与设置。LED驱动电路的输入触发信号可通过双向开关进行选择,由内置信号源给出或由外置信号源给出,外置输入信号为标准NIM信号。输入信号经过脉宽成形电路后,形成具有一定脉宽的快脉冲信号,该脉冲信号通过驱动电路控制输出电流开关,控制LED在额定功率下工作。为了分析光刻度系统光源能否满足要求,首先要确认LED脉冲驱动电路是否稳定,若采用外置工作模式,还要确认脉冲发生器是否稳定,对此我们进行了实验测试。在测试过程中,外置信号源的输入信号采用由Ortec公司的脉冲产生器P1010提供的标准NIM信号,其脉宽为40ns,前后沿时间小于3ns;LED驱动电路输出信号的上升时间 $t_r < 10\text{ns}$,下降时间 $t_d < 30\text{ns}$ 。对脉冲发生器输出信号、LED驱动电路信号进行测试的结果表明,该光源系统工作稳定,能很好地满足刻度要求。

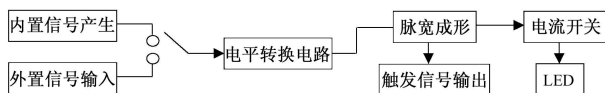


图2 快脉冲驱动原理图

3.3 小功率LED方案性能测试

该方案是在探测器单元的两端光导上安置小的蓝光LED光源,LED采用快脉冲电路驱动,LED发出的蓝光传输到光导中,部分蓝光经过反射折射后到达单元另一端的光导而被PMT接受,由此可得到幅度与时间信息以完成刻度。该方案优点是LED光源通过快脉冲电路驱动,信号响应快,并且LED容易固定在单元两端的光导上,脉冲驱动信号通过细导线连接到LED。不足之处是很难监测光源的稳定性,如果对每一个小LED光源进行监测,其成本相对较高。为研究该方案的可行性,首先对小LED器件的稳定性开展了详细的测试研究,看其是否能很好地满足光刻度系统

光源的要求。

选用的测试对象是杭州中宙光电公司生产的小功率平头无帽沿系列蓝光LED,该系列的LED蓝光波长范围是459—485nm^[13]。采用快脉冲电路驱动LED,用光电倍增管R7724直接读出LED发出的蓝光。其中,LED驱动电路工作在外置输入模式下,其输入触发信号为P1010提供的标准NIM信号,脉宽为40ns,频率为10Hz,R7724与LED通过空气耦合。LED光输出稳定性测试电子学框图如图3所示。

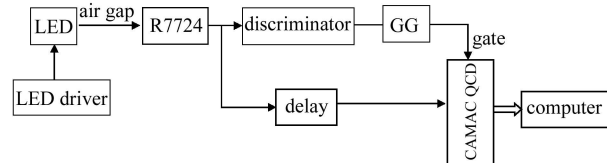


图3 LED光输出及稳定性测试电子学框图

为分析单个小LED的光输出稳定性和个体之间的差异,在相同的测试条件下,测试比较了相同类型的两只平头无帽沿系列LED。

测试结果表明,同一只小功率LED光输出随时间的涨落不大一致。图4给出了小LED光输出由QDC积分的电荷谱的峰值道数涨落,其中,LED01的涨落幅度为2%,LED02的涨落幅度为3%。图中横坐标为数据文件分段处理后拟合所得Q值的标号,亦可理解为不同时间段的段数目(图5、图6横坐标意义同)。而同型号的LED个体之间光输出也有较大差异,表现在峰值相差较大。由于脉冲发生器输出信号、LED驱动电路信号基本是稳定的,因此,以光电倍增管读出LED的蓝光信号所获得的QDC积分谱出现的晃动和涨落主要是由于小功率LED自身光输出涨落所引起,而不同LED之间的个体差异主要取决于其制作工艺过程。采用小功率LED直接耦合固定在中子墙单元两端光导上的刻度系统方案由于存在个体自身涨落较大、个体之间差异过大等不足之处,该方案难以满足光刻度系统要求。

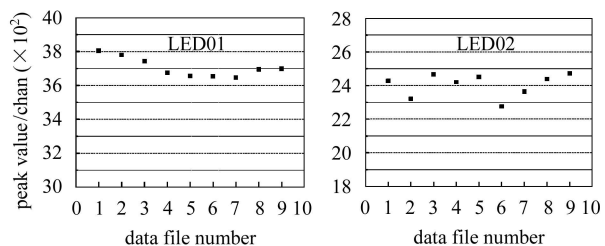


图4 LED01与LED02光输出由PMT读出QDC积分谱峰值涨落

3.4 大功率LED方案性能测试

该方案是以大功率蓝光LED作为光源,使其在快脉冲方式下工作,所发之蓝光经过空气耦合到细光纤,再由光纤将其导入到单元两端光导.随后,部分蓝光经反射折射后传输到单元另一端的光导并被光电倍增管接受,从而完成刻度.该方案的优点是可以减少光源的绝对数量,从而可方便地对光源工作状态进行监测.而且,即使光源光输出改变,也可以通过监测探测器记录的幅度信息予以修正.在解决了大功率LED的快脉冲驱动这一问题后,对大功率LED光源性能开展了详细的研究测试,以论证该方案的是否可行.

我们选用了中宙公司生产的3W蓝光LED,该类型LED光波长范围是465—485nm^[12].首先对其光输出稳定性进行测试,测试原理参看图3.测试中,采用一根芯径为1mm的塑料光纤将LED所发的蓝光导入到单元光导中,另一端的光导连接.此外,光纤束中预留2根光纤以监测光源的工作状态以及光源性能的变化.其中,一根光纤与监测探测器有机玻璃块耦合,在有机玻璃块的另外一端耦合光二极管(PD)进行光信号监测,另外一根为备用.

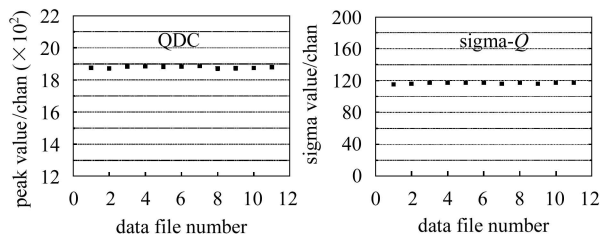


图5 3W蓝光LED光输出QDC积分谱涨落及展宽

此外通过对3W大功率LED重复启动多次的研究,其结果好于1%.通过对光均匀性的测试,其结果能很好地满足光刻度系统的刻度要求.在快脉冲驱动工作下的大功率LED性能也能很好地满足光刻度系统的要求.综合性价比多方面因素的考虑,该方案是中子墙光刻度系统的较佳选择.

3.5 量能器初步刻度结果

在确定了基于快脉冲驱动的大功率蓝光LED的中子墙光刻度系统方案后,以中子墙量能器单元为对象,对其光导入方式及导光光纤分别进行了测试研究,确立了中子墙的光导入方式为在光导上打孔为较佳的光导入方式,导光光纤为 $\phi 0.2\text{mm}$ 的石英光纤.

在此基础上,对中子墙探测器单元进行初步刻度,测试结果表明,从单元一端导入光,另一端由PMT读出并由TDC记录的时间信号基本稳定,其幅值和峰展宽都较为稳定,幅值涨落好于0.4%,且随着时间的推移基本稳定.初步刻度结果表明基于快脉冲驱动的大功率蓝光LED的中子墙光刻度系统方案是较为理想的一种方案.

对于整个中子墙光刻度系统而言,若只用一个大功率蓝光LED,很难确保各光纤之间的光均匀性问题.为此,我们拟将采用结构相同的几个独立光源系统.图6给出了单个光源刻度系统的构成示意图.LED与光纤束之间为空气耦合.光纤束一端经过抛光并紧密固定在一起接受来自LED的蓝光,另一端每根光纤分别与中子墙单元的光导连接.此外,光纤束中预留2根光纤以监测光源的工作状态以及光源性能的变化.其中,一根光纤与监测探测器有机玻璃块耦合,在有机玻璃块的另外一端耦合光二极管(PD)进行光信号监测,另外一根为备用.

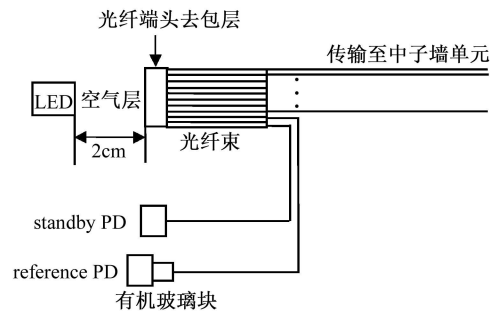


图6 中子墙刻度系统单个光源构成示意图

4 结论

本文对中子墙光学刻度系统备选方案的可行性进行了研究,确定了中子墙光刻度系统的方案.该光刻度系统将采用3W的蓝光大功率LED作为光源,使其工作在快脉冲驱动方式下,同时利用光纤将光信号导入单元两端的光导中以实现刻度.初步刻度结果表明,该方案是快信号探测器的一种性价比较高的新型方案.

感谢中国科学院高能物理研究所吕军光研究员的多次有益的讨论.

参考文献(References)

- 1 Anne T, Bazin D, Mueller A C et al. Nucl. Instrum. Methods, 1987, **A257**: 215
- 2 Sherril B M et al. Nucl. Instrum. Methods, 1991, **B56/57**: 1106
- 3 Kubo T, Ishihara M, Inabe N et al. Nucl. Instrum. Methods, 1992, **B7**: 309
- 4 Geissel H, Armbruster P, Behr K H et al. Nucl. Instrum. Methods, 1992, **B70**: 286
- 5 ZHAN Wen-Long, GUO Zhong-Yan, XIAO Guo-Qing et al. Science in China, 1999, **A42**(5): 528
- 6 SUN Zhi-Yu, ZHAN Wen-Long, GUO Zhong-Yan et al. Nucl. Instrum. Methods, 2003, **A503**: 496
- 7 XU Hua-Gen, XU Hu-Shan, LI Wen-Fei et al. HEP & NP, 2006, **30**(1): 57 (in Chinese)
- 8 FU Fen, XIAO Zhi-Gang, JIN Gen-Ming et al. HEP & NP, 2006, **30**(11): 1083 (in Chinese)
- 9 (付芬, 肖志刚, 靳根明等. 高能物理与核物理, 2006, **30**(11): 1083)
- 10 Andronia A, Bondania M, Bonesini M et al. Nuclear Physics, 2003, **B125**(Proc. Suppl.): 32—36
- 11 Kichimi H, Yoshimura Y, Browde T et al. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, 2000, **A453**: 315
- 12 MIAO J D et al. Photoelectron Technology. Hangzhou: Zhejiang University Press, 1995. 25 (in Chinese)
- 13 (缪家鼎等. 光电技术. 杭州: 浙江大学出版社, 1995. 25)
- 14 <http://www.bicron.com>
- 15 <http://www.zhongzhouopto.com>

Study of the LED Based Light Calibration System for Neutron Wall Detector*

YU Yu-Hong^{1,2,1)} XU Hua-Gen¹ ZHAN Wen-Long¹ XU Hu-Shan¹ SU Hong¹ LI Xiao-Gang¹
SUN Zhi-Yu¹ XIAO Zhi-Gang¹ HU Zheng-Guo¹ GUO Zhong-Yan¹ WANG Jian-Song¹
CHEN Ruo-Fu^{1,2} FAN Rui-Rui^{1,2} ZHENG Chuan^{1,2}

1 (Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

2 (Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract The light calibration system is one of the key components of Neutron Wall detector. It is used to calibrate the electronics and to monitor the long-term stability of the detector modules. With the detailed investigations, a calibration system with high-power LED (3W) driven by the fast pulses has been carried out. It is also tested together with the detector module of the Neutron Wall and the result of the preliminary calibration demonstrates that it fulfills the needs. It's a new design proposal to the light calibration system of the fast scintillator detector.

Key words HIRFL-CSR, RIBLL II, neutron wall, LED light calibration system

Received 29 September 2006

* Supported by HIRFL-CSR Project (Lanzhou China)

1) E-mail: yuyuhong@impcas.ac.cn