

强流脉冲电子束时间分辨测试技术研究

汪 伟 畅里华 陈思富 李 剑 杨国君 邓建军

(中国工程物理研究院流体物理研究所, 四川绵阳 621900)

摘 要 简单介绍了 LIA 注入器中强流脉冲电子束能谱分布及发射度的测量原理. 应用变象管扫描相机测量了脉冲宽度为 100ns 的强流脉冲电子束的能谱分布及发射度两个参量, 得到了具有时间分辨本领为 1ns 的切伦科夫辐射图像. 为强流直线感应加速器的研制, 提供了实验数据.

关键词 变象管扫描相机; 高速摄影; 能谱分布; 发射度; 强流脉冲电子束

中图分类号 TB872 **文献标识码** A

0 引言

强流直线感应加速器的研制工作中, 高功率电子束束流的能谱分布和发射度是表征电子束品质的重要技术参数指标, 低能散度和低发射度的电子束是提高自由电子激光(FEL)高抽取效率、高输出功率的决定因素^[1], 品质差的电子束将导致 FEL 增益曲线的非线性. 为研究阴极材料、电场分布、磁场结构、引出和传输对能散度和发射度的影响, 必须有相应测量电子束能散度和发射度的手段.

强流电子束能散度和发射度的测试, 过去, 国内均只能用时间积分的方法获得^[2~4], 而众多专业人员更多是对电子束的时间分辨特性最为感兴趣. 要得到具有时间分辨的信息, 就必须采用有时间分辨本领的记录仪器. 目前, 人们一般首选光学法. 在光机式高速摄影仪器中, 转镜部件的高速运动特别受到驱动功率、材料极限转速、动态象质等多方面的限制, 它们的时间分辨本领或摄影频率在现有条件下很难有大幅度的提高. 在“神龙一号”直线感应加速器注入器上, 我们首次应用超高速变象管扫描相机对电子束的能谱分布和发射度进行了研究. 将电子束打在石英玻璃上产生切伦科夫辐射, 具有“连续谱的可见光”^[5]是切伦科夫辐射的特性之一, 因而可以用变象管相机对切伦科夫辐射进行记录, 进而得知电子束的某些待测特性.

1 变象管扫描相机的实验准备

1.1 相机与加速器的同步

要实现相机与加速器的精确同步, 就必须准确知道相机的触发延时, 相机的触发延时是指从触发信号输入到相机开始扫描的时间间隔.

测试装置按图 1 所示布置. 变象管相机处于等待扫描状态, 皮秒光脉冲源处于单脉冲触发状态, 光

源直接照射相机的狭缝并能为相机所接收, 高精度数字延时脉冲发生器分别控制相机和光源. 在延时发生器上设置延时时间 T_1 触发相机, 设置延时时间 T_2 触发光源, 调整 T_1 或 T_2 使皮秒光脉冲正好在相机狭缝扫描开始时刻出现, 此时就表明相机与光源已处于同步工作状态. 光源输出延迟时间 T_3 可用数字示波器精确测量. 显然相机的触发延时 T 与 T_1 、 T_3 有如下关系(单位均为 ns)

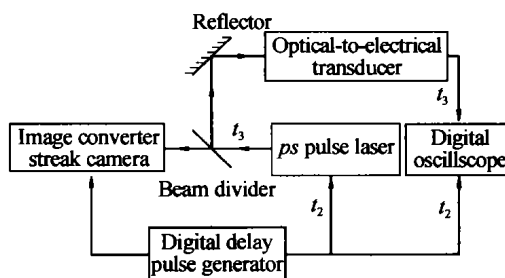


图 1 相机延时测试装置
Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup for camera's delay

$$T + T_1 = T_3$$

则触发延时

皮秒光脉冲的触发延时为 $T_4 = 177$ ns, 则

$$T_3 = T_2 + 177$$

最终相机的触发延时可以表示为

$$T = T_2 - T_1 + 177 \quad (1)$$

一般情况下, 在延时脉冲发生器中设置 T_1 或 T_2 中的一个为 0 延时, 即所有延时时间以 0 延时为基准, 以方便计算.

本次测试中, $T_2 = 40$ ns, $T_1 = 0$, $T = 217$ ns.

加速器的触发延时也应精确测量, 但它的触发漂移(相对相机)较大, 在实际实验工作中, 比较稳妥的方法是: 相对于加速器的触发时刻, 适当增加相机的触发延时, 以及选用稍大档位的扫描时间, 可以有效避免被观察过程的丢失.

1.2 扫描时间及扫描速度的精确标定

虽然变象管扫描相机有很高的扫描速度和分辨率, 但是, 扫描速度非线性较大是它的一个缺陷.

扫描速度非线性直接影响到扫描时间的测量,给实验结果的分析带来误差,为此,必须对相机的扫描时间和扫描速度进行标定,根据标定结果处理实验数据,可使实验结果更加可信. 对这两个参量的标定方法,已经有文献[7]作了详细的论述,这里仅给出标定结果(扫描时间 t 的单位为 ns,像面位置 s 的单位为 mm).

$$t = 1.8 + 2.8s + 0.038s^2 \quad (2)$$

由式(2)得到整个像面(40 mm)的扫描时间是 174.6 ns,平均扫描速度为 229.1 km/s.

1.3 相机的时间分辨本领

由于没有合适的光源,相机的时间分辨本领无法直接测出. 但通过分析,也可估算出相机的时间分辨率. 针对该相机,影响时间分辨率 τ 主要有两个方面的因素^[6]:狭缝宽度在相机最终像面上引起的时间误差 τ_1 、不同速度的光电子在光阴极和栅网间造成的时间误差 τ_2 . 实验中,相机狭缝在最终像面上的宽度为 0.12 mm,与相机最终像面空间分辨率基本匹配,根据 1.2 对扫描速度的标定数据, $\tau_1 \approx (0.12 \text{ mm}) / (229.1 \text{ km/s}) \approx 0.52 \text{ ns}$,两个因素对相机时间分辨本领的贡献相当^[6],故 $\tau = \sqrt{\tau_1^2 + \tau_2^2} \approx 1 \text{ ns}$.

1.4 防电磁干扰设计

实验时,LIA 注入器会发出强 X 射线及其它电磁辐射,这些辐射源会干扰变象管相机工作,导致相机的误触发. 通过采取给交流电源加上隔离变压器和稳压电源后再输出到相机,以及将相机用铅砖屏蔽等措施后,相机未出现误触发,证明这些措施是有效的.

2 测试原理、装置及实验

2.1 能谱分布

2.1.1 测试原理和测试装置

借助于精密的均匀磁场,可以进行能谱分布的测试. 它的测试原理是利用电子在均匀磁场中的色散特性,由电子在出口处的成像位置和像宽可直观地观察电子的能谱分布,再根据磁感应强度计算出电子束能量及能散度^[2]. 测试示意图如图 2. 电子束经过一段距离的漂移进入经精密设计的均匀磁场(必须保证均匀磁场不受注入器磁场的干扰),不同能量的电子在均匀磁场中发生偏转后,再经过一段距离的漂移打在石英板的不同位置上,由变象管相机记录产生的切伦科夫辐射过程,得到电子束随时间的能谱分布. 能谱分布的半高宽与电子能量之比即是电子束的能散度.

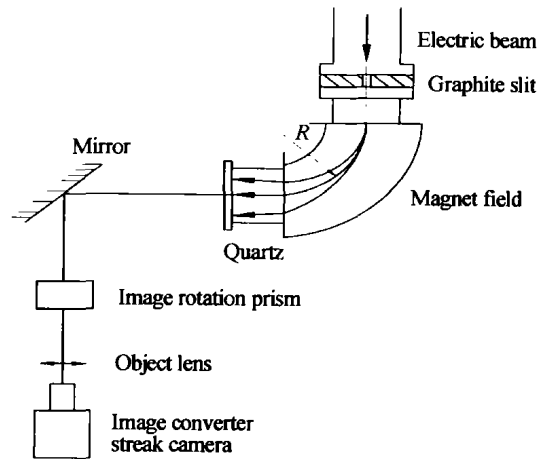


图 2 能谱分布测试装置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of experimental setup for energy spectrum distribution

根据文献[2],在已知的磁场 B 中,如果知道了电子的偏转半径 R ,则电子的能量为

$$E = m_0 c^2 \left[\sqrt{1 + \left(\frac{eBR}{m_0 c} \right)^2} - 1 \right] \quad (3)$$

通过图像处理,测得电子打在石英板上的方位,可计算出偏转半径 R ,通过还原计算得到电子的能量 E .

2.1.2 实验测量

实际测试试验中,由于不同能量电子束在石英板上的分布方向与变象管相机的狭缝方向垂直,因此需要在相机前面增加转向机构,通过调节转向机构使得不同能量的电子束分布方向与相机的狭缝方向平行.

实验中除了要注意触发同步外,还要有适当的物像倍率,以便实验图像的分析.

2.1.3 实验结果及分析

实验使用尺寸为 20 mm×80 mm×0.5 mm、背面经过磨砂处理的石英玻璃作为辐射体,用变象管

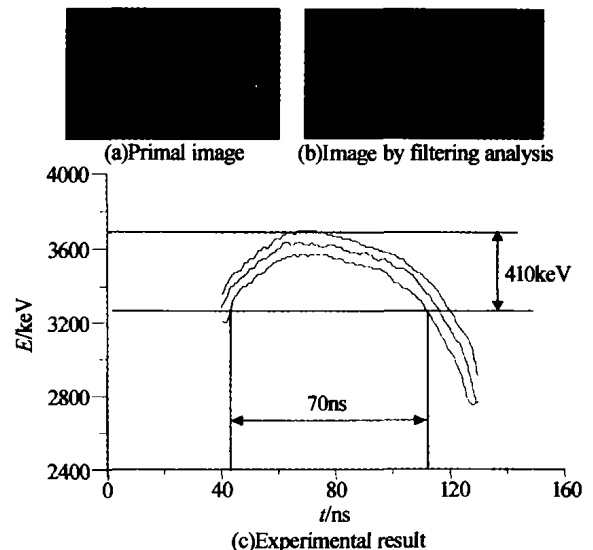


图 3 改造前的能谱分布

Fig. 3 Energy spectrum distribution before amelioration

扫描相机接收切伦科夫辐射光.

图 3 为改造前 LIA 3.5 MeV 注入器的时间分辨能谱分布.

从图 3(c)可以看出:在 70 ns 的范围内,注入器电子束的最大动能为 3.6 MeV,能散度为 12%.

图 4 为改造后 LIA 3.5 MeV 注入器的时间分辨能谱分布.

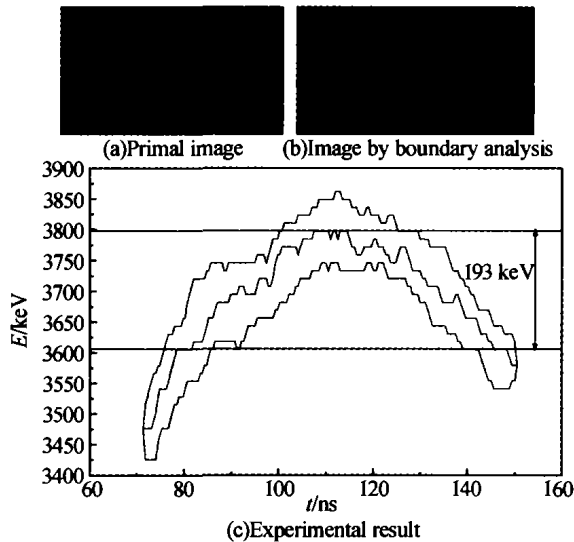


图 4 改造后的能谱分布
Fig. 4 Energy spectrum distribution after amelioration

由图4可以计算出该电子束的能散度为5.3%与改造前的注入器相比(图 3),能散度明显减小.

2.2 发射度

2.2.1 测试原理

测试示意图如图 5. 发射度的测量是利用经典的多孔板测量方法(也称作胡椒孔法^[4]). 变象管相机的狭缝选择其中一排小孔作为研究对象. 电子束通过多孔板时,其中大部分被多孔板吸收,小部分电子束通过小孔打在石英毛玻璃上产生切伦科夫辐射,由变象管相机对光辐射进行扫描记录.

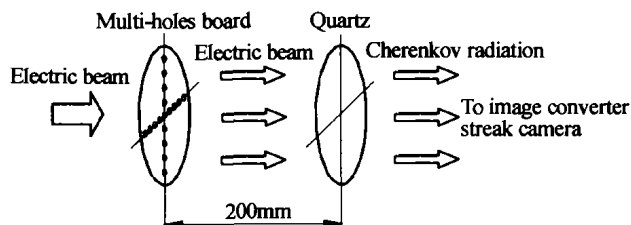


图 5 发射度测试原理
Fig. 5 Schematic diagram of experimental setup for emittance

相机记录到通过每一个小孔电子束产生的切伦科夫辐射图像,经过黑密度处理后,可以作出电子束每一时刻的发射度图像.

2.2.2 实验条件

实验中采用厚度为 1.8 mm、直径为 80 mm、厚度为 1.8 mm 的钨靶作为多孔板,多孔板的小孔直径为 1 mm,孔距为 5 mm. 在石英玻璃前面加厚度为 2 mm 的铝箔,用于遮挡散射电子.

2.2.3 实验结果及分析

图 6和图7是不同实验条件下取得的实验图像.

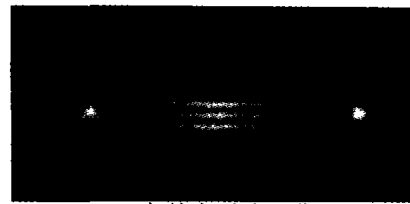


图 6 发射度测试图像
Fig. 6 Image of emittance

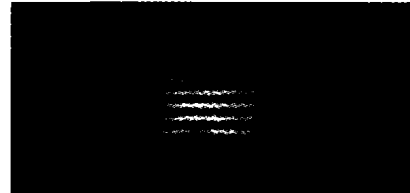


图 7 发射度测试图像
Fig. 7 Image of emittance

从图像来看,多孔板孔距偏小,实验效果不很理想. 但从图像上可以看出,电子束束流振荡很大,说明该注入器还需进一步调试.

3 结论

1)用超高速变象管扫描相机可以记录到 3.5 MeV 注入器中强流脉冲电子束产生的切伦科夫光辐射.

2) 通过采取一些抗干扰措施,例如为供电电源增加隔离变压器和稳压电源、使用铅砖对相机屏蔽等,该相机可以在强干扰条件下正常工作.

3)扫描时间及扫描速度标定结果与相机标称值有较大差别,试验中必须对相机进行标定,根据标定后的拟合方程处理实验结果.

4)测试的能散度图像及根据发射度图像观察到的电子束束流振荡的情况,指明了该注入器进一步改进的方向.

5)通过在注入器上的测试实验,为 20 MeV LIA 强流脉冲电子束的束剖面、能散度和发射度的测试积累了工作经验,可为其调试工作提供可靠的依据.

在工作实验过程中,始终得到了谭显祥研究员的指导和帮助,在此深表谢意.

参考文献

- 1 Turner W C. Reduction of the beam corkscrew motion on the ETA-II LIA. Proc. 1990 Linac Conf. Albuquerque, NM, Sept, 10-14, 1990. 435~437
- 2 邓建军. 3.3 MeV LIA 强流脉冲电子束能谱测量. 强激光与粒子束, 1993, 5(3): 353~358
Deng J J. High Power Laser and Particle Beams, 1993, 5(3): 353~358
- 3 祝大军. 脉冲电子束发射度在线测量. 绵阳: 全国高功率粒子束十年文集, 1995. 448~454
Zhu D J. Real time Measurement for Emittance of Pulse

- Electron Beam, Mianyang; The decade selected works of high pulsed power in china, 1995. 448~454
- 4 [美]小斯坦利·汉弗莱斯. 带电粒子束. 北京:原子能出版社, 1991. 53~54
- Stanley Humphries. Jr. Charged particle beams. Beijing: Atomic energy press, 1991. 53~54
- 5 王祝翔. 核物理探测器及其应用. 北京:科学出版社, 1964. 213
- Wang Z X. Nuclear physics detector and application. Beijing: Science press. 1964. 213
- 6 谭显祥. 光学高速摄影测试技术. 北京:科学出版社, 1990. 112~113
- Tan X X. Test technique for optical high speed photograph. Beijing: Science Press. 1990. 112~113
- 7 汪伟. 高速变象管相机扫描时间和扫描速度的标定技术. 强激光与粒子束, 2002, 14(6): 827~830
- Wang W. *High Power Laser and Particle Beams*, 2002, 14(6): 827~830

High Resolution Test Technology for High-current Pulse Electron Beam

Wang Wei, Chang Lihua, Chen Sifu, Li Jian, Yang Guojun, Deng Jianjun
Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900

Received date: 2004-06-10

Abstract The measurement for energy spectrum distribution and emittance of high-energy pulse electron beam in LIA injector is introduced simply in principle. Two parameters of 100ns pulse electron beam are measured and Cerenkov radiation images with 1ns resolution are obtained with image converter streak camera. The experimental data are offered.

Keywords Image converter streak camera; High speed photograph; Energy spectrum distribution; Emittance; High-energy pulse electron beam



Wang Wei was born in 1974. He received B. S. degree in 1998 from Xi'an Institute of Technology. Now He works at Institute of Fluid Physics, CAEP. His research interest is high speed photography.