

文章编号: 1001-4322(2010)04-0812-05

多脉冲电子束发射度测量*

夏连胜, 张 篁, 陈德彪, 张开志, 章林文, 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: 采用多孔板并结合电子束在石英片相互作用产生的契仑柯夫辐射,对以天鹅绒为阴极发射的强流多脉冲电子束发射度和亮度进行了实验研究和测量。实验观测到了有外加磁场条件下的电子束发生旋转现象。对于电子能量为 600 kV 左右的电子束,多孔板处的磁场小于 2.7 mT 时,电子束元的偏离已经小于 2° 。分别测量了天鹅绒阴极发射的强流四脉冲电子束和双脉冲电子束的积分亮度,分别为 $7.5 \times 10^7 \text{ A}/(\text{m} \cdot \text{rad})^2$ 和 $4.14 \times 10^8 \text{ A}/(\text{m} \cdot \text{rad})^2$ 。结果表明,双脉冲电子束的积分亮度明显优于四脉冲电子束的积分亮度,进而验证了阴极等离子体对多脉冲电子束亮度具有重要影响,降低了电子束的品质。

关键词: 电子束; 多脉冲; 发射度; 亮度

中图分类号: TL53 **文献标志码:** A **doi:**10.3788/HPLPB20102204.0812

相对论强流多脉冲电子束在高功率微波、高功率激光和电子束辐照效应研究等领域有着广泛的应用前景。电子束的品质对强流电子束在上述方面的应用具有重要的意义,它影响着相对论强流电子光学系统的设计,最终影响着电子能量转换成微波能量、光能量的效率和峰值功率密度。电子束的发射度和亮度是描述电子束品质的主要参量,其测量通常采用多孔板法(胡椒筒)。文献[1-3]利用一台 2 MeV 直线感应强流电子注入器建立了双脉冲和四脉冲强流电子束源,阴极发射体为天鹅绒。本文利用文献[2-3]中的多脉冲强流电子束源,进行了天鹅绒阴极在多脉冲条件下产生的多脉冲电子束的积分发射度测量,得到天鹅绒阴极产生的多脉冲电子束的亮度,并讨论了影响实验测量结果的几个因素。

1 实验装置和多孔板处磁场对测量结果的影响

胡椒筒结合荧光屏是测量脉冲电子束发射度的主要手段之一^[4]。本文采用了简化的胡椒筒结合荧光屏电子束发射度测量的方案。具体简化措施是将多孔板改为十字正交的多孔板,荧光屏由石英玻璃片代替,利用电子束在石英片中产生的契仑柯夫效应获得经过小孔和自由空间漂移后电子束的束斑,进而获得电子束的散角和束包络半径的信息,得到电子束的发射度。

在测量中,多孔板有效直径为 80 mm,小孔直径 1 mm,在相互垂直的方向上各有 9 个孔。电子束元经过多孔板自由漂移 20 cm 后到达石英片处。为了方便对辐射光进行记录,将介质石英薄片同电子束运动方向垂直,辐射光输出方向与电子束运动轴夹角约 45° ,在此方向上设一个观测窗进行光信号记录,测量装置如图 1 所示。

测试数据的处理和分析是建立在单脉冲积分发射度数据分析处理基础上的^[5]。沿轴向 z 方向运动的自由电子束到达多孔板时,大部分被多孔板挡住,部分通过多孔板上的小孔自由运动到转换屏——石英屏,产生契仑柯夫辐射(参见图 1)。通过 CCD 相机将光强度分布信息记录下来,进一步分析处理得到电子束束斑均方根半径和发散角(参见图 2(a))。

设每个束斑的 1/2 最大黑密度处的宽度为 φ'_i ,则以多孔板中心为心, y 方向孔的发散角为

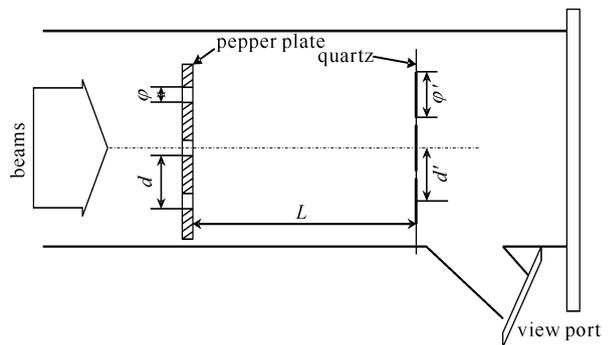


Fig. 1 Setup of emittance measurement for multi-pulse beams

图 1 多脉冲束发射度测量装置示意图

* 收稿日期:2009-11-10; 修订日期:2009-12-18

基金项目:国家自然科学基金项目(10575090); 中国工程物理研究院基金项目(20050209)

作者简介:夏连胜(1970—),男,博士,研究员,主要从事强流电子束源和脉冲功率技术研究;lsh_xia@yahoo.com.cn.

$$\alpha_i(t) = \frac{1}{2} \frac{1}{L} (\varphi'_i - \varphi) \quad (1)$$

式中: L 为多孔板到石英屏的距离, 在本文中为 200 mm。在 y 方向束的平均发散角为

$$\alpha_y = \frac{1}{n} \sum_1^n \alpha_i \quad (2)$$

如图 2(a) 所示, 由 y 轴上电子束包络线最高值的一半宽度给出束半径(半高全宽半径)

$$R_{b,y} = \frac{1}{2} \overline{AA'} \quad (3)$$

半高宽对应的束流半径和束流的均方根半径略有不同, 均方根半径比束包络半高宽半径稍小^[6]。实验中为方便起见, 取束包络半高宽为束流均方根半径, 根据电子束发射度定义, 得到电子束流均方根发射度计算表达式为

$$\epsilon_{\text{rms}} = \alpha_y R_{b,y} = \frac{1}{2} \overline{AA'} \times \frac{1}{n} \sum_1^n \alpha_i \quad (4)$$

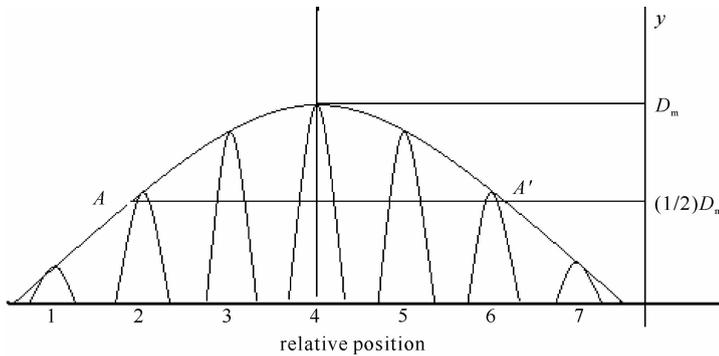
则归一化均方根发射度为

$$\epsilon_{n,\text{rms}} = \frac{1}{2} \gamma \beta \overline{AA'} \times \frac{1}{n} \sum_1^n \alpha_i \quad (5)$$

式中: γ 为相对论因子; β 为相对速度。对于高斯束, 均方根发射度对应的相面积包含 60% 束流。当相面积包含 90% 束流时, 所对应的发射度称为边发射度

$$\epsilon_e(t) \approx 4\epsilon_{\text{rms}} \quad (6)$$

图 2(b) 是得到的石英片背景图像, 在 y 方向有 487 个像素, 其对应的像素比为 $76/487 = 0.156 \text{ mm/pixel}$ 。在 x 方向有 364 个像素, 其对应像素比为 $76/364 = 0.208 \text{ mm/pixel}$ 。



(a) density distribution of beams

Fig. 2 Density distribution of beams and CCD photo of quartz

图 2 束元光斑密度分布示意图和 CCD 获得的石英片背景图像



(b) CCD photo of quartz

为了排除干扰光信号, 获得真实实验结果, 采取了以下措施: 除了在光路方向外, 其它方向都用黑纸挡住二极管传来的光和电子束打在尾部的盲板上可能产生的其它光; 在石英薄片后面放置石墨用来吸收穿过石英薄片的电子; 将管壁涂黑, 吸收杂散光。

多孔板处及其下游空间中的磁场对发射度的测量具有比较明显的影响。在外加轴向磁场作用下, 电子在束输运管道中作螺旋运动。经过多孔板的小孔后, 如果还有外加轴向磁场, 电子束元还将继续作螺旋运动, 当电子束元到达石英片时, 所在位置与初始位置不在同一坐标上, 而是偏离了一个角度。磁场越大, 偏离角度越大。如果多孔板处及其下游空间中无轴向磁场, 经过多孔板后的电子束元将在自由空间中作惯性运动, 并在空间电荷力的作用下发散。图 3 给出了多孔板处不同磁场条件下电子束元偏离情况。在束传输线上, 最后一个螺旋管线圈尾端距多孔板约 50 cm。从图中可以看出, 当电子能量为 600 kV 左右, 多孔板处的磁场小于 2.7 mT 时, 电子束元的偏离已经小于 2° 。将所得图像进行反向旋转后读其黑密度发现, 电子束包络呈明显的高斯分布(图 3(f))。

2 天鹅绒阴极产生的多脉冲电子束发射度及亮度

当脉冲功率系统输出脉冲电压激励注入器感应腔时, 感应腔上产生的电压脉冲叠加到真空二极管上, 天鹅

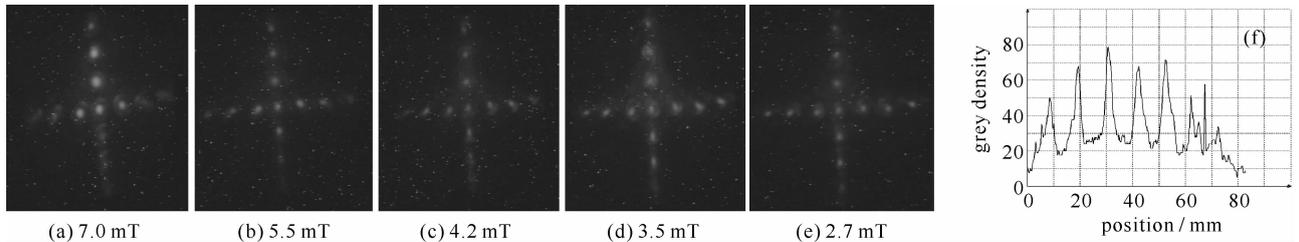


Fig. 3 Effect of magnetic field at pepper plate on measurement

图 3 多孔板处磁场强度对测量结果的影响

绒阴极在外加电场 (>50 kV/cm) 作用下, 产生场致等离子体发射^[7-8]。天鹅绒阴极发射的电流在外加引导磁场作用下, 通过阳极孔和真空管道到达多孔板处。在多孔板上游 40 cm 处有测量电子束流强度和束心位置的电阻环给出束流大小和束流偏心情况^[9]。图 4(a) 给出的是四脉冲电子源二极管电压脉冲信号和发射电流信号, 图 4(b) 给出的是电阻环测量到的四脉冲束流信号, 束流脉冲间隔在 500~600 ns 之间。

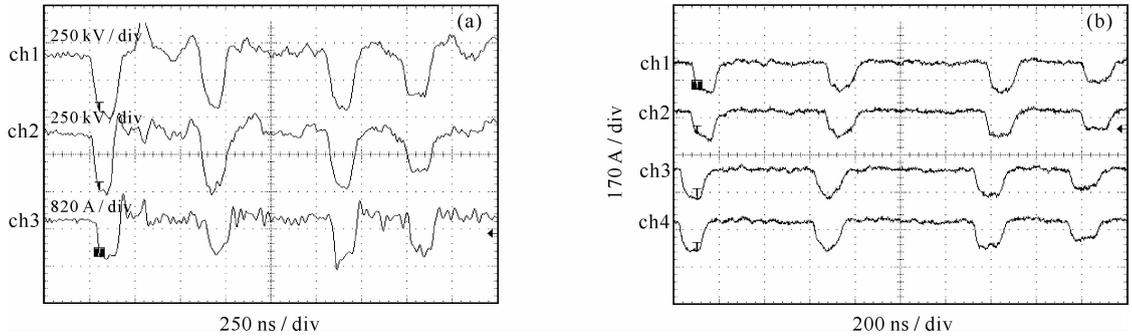


Fig. 4 Waveforms of diode voltage, cathode emission current and beam currents for four-pulse mode

图 4 四脉冲二极管电压、阴极发射电流和电阻环测到的束流

由于机械加工原因, 多孔板 x 方向所开的孔不在一条直线上, 扫描所得结果会产生偏差, 故仅对 y 方向进行了扫描和数据拟合(图 5), 得到电子束元产生的光斑平均半高宽为 2.32 mm, 束包络均方根半径为 35 mm。则对应束平均发散角为 3.29 mrad, 电子束的均方根发射度为 115 mm · mrad。由于每个二极管脉冲电压幅度约 300 kV, 则电子束的相对论因子 $\gamma=1.587$, $\beta=0.776$, 电子束流归一化均方根发射度约为 142 mm · mrad, 归一化边发射度为 568 mm · mrad。电阻环测量到的四脉冲束流为 120 A, 因此, 由电子束亮度的定义^[10], 得到四脉冲电子束源产生的电子束积分归一化亮度约为 7.5×10^7 A/(m · rad)²。

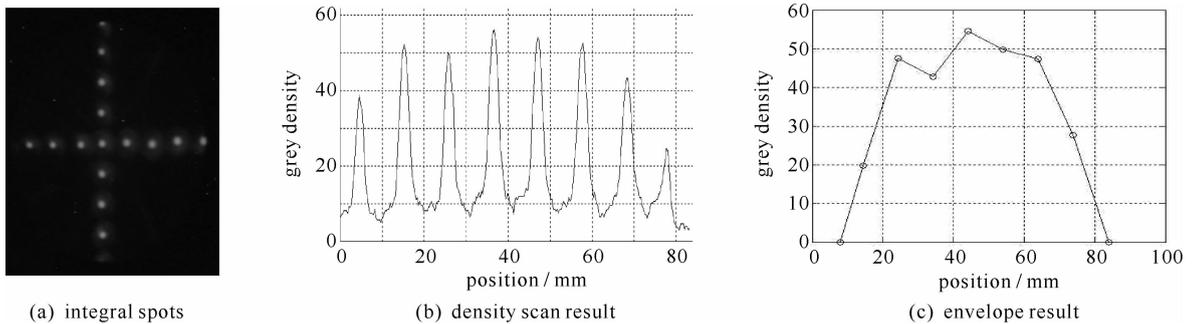


Fig. 5 CCD photo of integral spots, density scan result, and envelope result of four pulsed beams

图 5 四脉冲束积分光斑、密度扫描及包络半径处理结果

当电子束源运行在双脉冲情况下, 得到二极管电压、发射电流和电子束源出口处束流波形如图 6 所示。第 1 个二极管脉冲电压幅度为 589 kV, 第 2 个二极管脉冲电压幅度为 570 kV。发射电流分别为 2.2 kA 和 2.4 kA。束源出口处束流分别为 374 A 和 390 A。

双脉冲条件下得到发射度信息及处理结果如图 7 所示。得到电子束元产生的光斑平均半高宽为 1.65 mm, 束包络均方根半径为 32.5 mm。则对应束平均发散角为 1.63 mrad, 电子束的均方根发射度为 53 mm · mrad。电子束的相对论因子 γ 为 2.17, $\beta=0.888$, 电子束归一化均方根发射度约为 102 mm · mrad, 归一化边发射度为 408 mm · mrad。取脉冲束流为 370 A, 因此, 得到双脉冲电子束源产生的电子束积分归一化亮度约

为 $4.14 \times 10^8 \text{ A}/(\text{m} \cdot \text{rad})^2$ 。

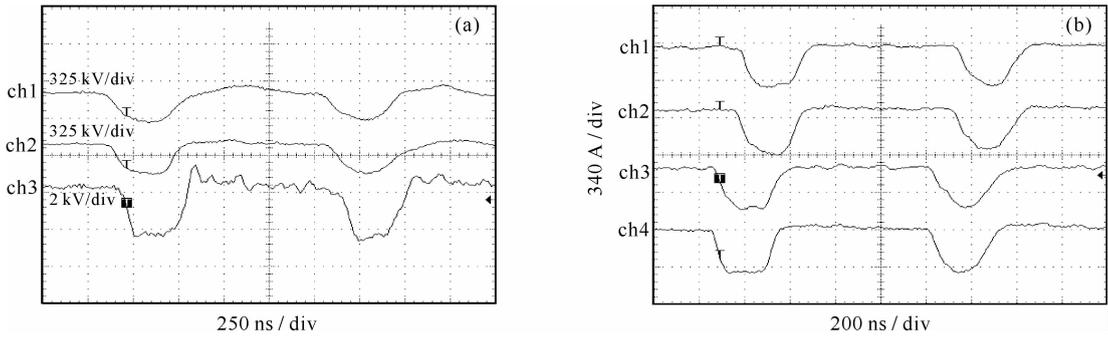


Fig. 6 Waveforms of diode voltage, cathode emission current and beam currents for two pulse mode

图 6 双脉冲二极管电压、阴极发射电流和电阻环测到的束流波形

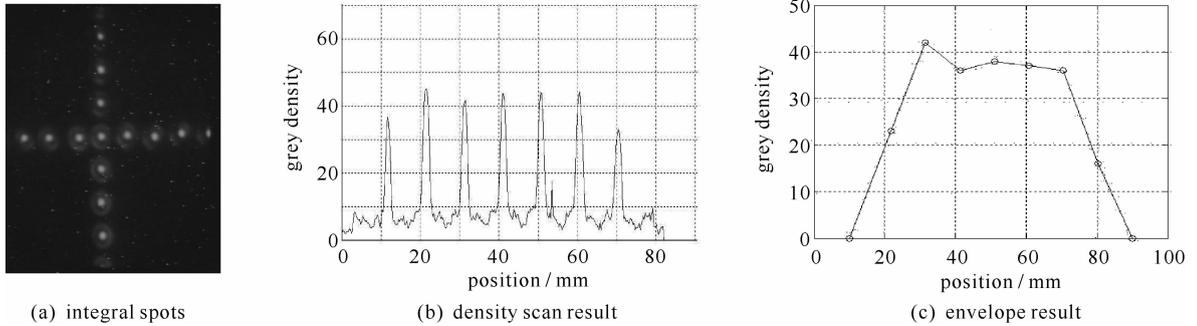


Fig. 7 CCD photo of integral spots, density scan result, and envelope result of double pulsed beams

图 7 双脉冲束积分光斑、密度扫描及包络半径处理结果

3 结 论

通过实验,研究了对发射度测量结果影响的因素,利用 CCD 成功地获得了以天鹅绒为阴极的电子束源产生的多脉冲电子束的积分发射度图像。CCD 图像清晰,每个电子束元满足高斯分布。结果表明,该发射度测量方法可行。同时,结合束流测量装置,得到多脉冲电子束的积分亮度。实验得到的多脉冲电子束的积分归一化亮度为 $10^8 \text{ A}/(\text{m} \cdot \text{rad})^2$,和单脉冲电子束亮度实验值具有相同的量级^[11]。实验结果表明,双脉冲电子束的积分发射度和四脉冲电子束的发射度存在一定差异。造成这种差异的原因在于天鹅绒阴极在强流发射过程中产生的向阳极发展阴极等离子体。

参考文献:

- [1] Dai Guangsen, Xie Min, Liu Xiaoping, et al. The pulsed power system for 2 MeV electron beam source[C]//Proc 3rd Inter Symp on Pulsed Power and Plasma Applications. 2002;201-203.
- [2] 夏连胜,王勤,黄子平,等. 强流 4 脉冲电子束源实验研究[J]. 强激光与粒子束, 2004, **16**(2):251-255. (Xia Liansheng, Wang Meng, Huang Ziping, et al. Experiment on 4-pulsed intense electron beam source. *High Power Laser and Particle Beams*, 2004, **16**(2):251-255)
- [3] 夏连胜,章林文,黄子平,等. 双脉冲电子束源实验研究[J]. 强激光与粒子束, 2004, **16**(7):943-946. (Xia Liansheng, Zhang Linwen, Huang Ziping, et al. Experimental research on a double pulsed beam source. *High Power Laser and Particle Beams*, 2004, **16**(7):943-946)
- [4] Derenchuk V. Emittance measurements of the high intensity polarized ion source at IUCF[C]//Proceedings of the 1995 Particle Accelerator Conference. 1995;1010-1012.
- [5] 程念安. 脉冲强流束发射度测量[C]//10 MeV 直线感应加速器会议文集. 1994. (Cheng Nian'an. Emittance measurement of pulsed intense beam//Proc of 10 MeV LIA Conf. 1994)
- [6] 陈思富,丁伯南,夏连胜,等. 强流短脉冲电子束束剖面的时间分辨测量[J]. 强激光与粒子束, 2002, **14**(2):317-320. (Chen Sifu, Ding Bonan, Xia Liansheng, et al. Time-resolved beam profile measurement of the high-current, short-pulse electron beam. *High Power Laser and Particle Beams*, 2002, **14**(2):317-320)
- [7] Parker R K, Anderson R E, Duncan C V. Plasma induced field emission and the characteristics of high current beam flow[J]. *J Appl Phys*, 1974, **45**:2463-2467.
- [8] 夏连胜,王勤,黄子平,等. 强流电子二极管中阴极等离子体的膨胀[J]. 物理学报, 2004, **53**(10):3435-3439. (Xia Liansheng, Wang Meng, Huang Ziping, et al. Explosion of cathode plasma in intense multi-beams electron vacuum diode. *Acta Physica Sinica*, 2004, **53**(10):3435-

3439)

- [9] 谢宇彤,代志勇,韩青. 电阻环束流探测器的标定[J]. 强激光与粒子束, 2002, **14**(1):151-155. (Xie Yutong, Dai Zhiyong, Han Qing. Improvement on the accuracy of beam bugs in linear induction accelerator. *High Power Laser and Particle Beams*, 2000, **14**(1):151-155)
- [10] 陈佳洱. 加速器物理基础[M]. 北京:原子能出版社, 1993. (Chen Jiaer. Introduction to accelerator physics. Beijing: Atomic Energy Press, 1993)
- [11] 代志勇,祝大军,胡声钟,等. 2 MeV 有箔注入器的束流调试[J]. 强激光与粒子束, 2000, **12**(3):371-374. (Dai Zhiyong, Zhu Dajun, Hu Shengzhong, et al. Beam transport of 2 MeV foil injector. *High Power Laser and Particle Beams*, 2000, **12**(3):371-374)

Measurement of multi-pulsed electron beams emittance

Xia Liansheng, Zhang Huang, Chen Debiao, Zhang Kaizhi, Zhang Linwen, Deng Jianjun
(*Institute of Fluid Physics, CAEP, P. O. Box 919-106, Mianyang 621900, China*)

Abstract: The emittance of multi-pulsed electron beams was experimentally measured using pepper pot and thus the corresponding brightness was calculated. Different from using fluorescent screen as the recorder of beam divergence angle, a quartz foil was used to record the information through Cerenkov radiation, which is generated by the interaction of electron beamlets and the quartz foil. The phenomenon of beam rotation in magnetic field was observed in the experiment, and the integrated brightness of double-pulsed and four-pulsed beams were measured. For the electron beam of about 600 kV, the divergence of beamlets was below 2° when the magnetic field at the pepper plate was lower than 2.7 mT. The calculated brightnesses of the double-pulsed and four-pulsed beams were $4.14 \times 10^8 \text{ A}/(\text{m} \cdot \text{rad})^2$ and $7.5 \times 10^7 \text{ A}/(\text{m} \cdot \text{rad})^2$ respectively. The difference may be due to the movement of cathode plasma.

Key words: multi-pulsed electron beams; emittance; brightness; cathode plasma