

高功率强流密度低发射度高亮度 赝火花电子束产生*

朱俊彪[†] 王之江 张立芬 陆载通 黄 羽 王明常

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

(1995年2月28日收到)

由修改了的脉冲线加速器驱动的、高功率(200 kV)、高电流密度、低发射度、高亮度赝火花放电电子束在 15 Pa 氦气中产生。束流强度 2.2 kA, 脉宽 400 ns, 束径 1 mm 的电子束从阳极口射出, 可在中性氦电离通道中传输 20 cm。在阳极下游 5 cm 处, 电子束相继打穿紧密粘贴在一起的酸敏纸和 0.05 mm 厚的铜箔, 分别留下 0.6 mm 和 0.3 mm 的穿孔。依据箍缩平衡条件算出该处的高能电子束的归一化发射度和亮度分别是 $23 \pi \text{ mm mrad}$ 和 $8 \times 10^{10} \text{ A/(m}^2 \text{rad}^2)$ 。对同一酸敏纸连续轰击 10 次给出 1.6 mm 穿孔表明它具有好的重复性。观察工作 60 枪后的放电室发现, 各种电极和绝缘子表面几乎未见任何破坏性烧蚀痕迹。实验证明, 赝火花电子束的束质量比冷阴极电子束的束质量要好得多。

PACC: 4180D; 5280; 2925; 4255T

1 引 言

赝火花(Pseudospark)放电是在一种特殊结构的称为赝火花放电室中发生的轴对称高电压(几十 kV 到几百 kV)、低气压(1—100 Pa)的气体放电现象。单隙空心阴极赝火花放电室由一个空心阴极和平板阳极构成, 中间插入单块绝缘盘以抑制边缘放电, 在电极中心轴对称地开有一孔径约 3—5 mm 的小孔, 形成系统共同的中心放电通道。单隙室的释抑电压低于 50 kV, 为使放电室能在高于 100 kV 电压下工作, 交替地在阴、阳极之间插入绝缘盘和中间电极, 形成一个类似由一系列的自电容分压的系统, 构成所谓多隙赝火花放电室。整个赝火花放电过程可分为三个时期: 点火期(Townsend 放电期), 空心阴极期(高能和低流期), 和传导期(低能和强流期)。基于放电初期发生在空心阴极内腔的空心阴极效应和空心阴极期末发生在阴极孔附近表面场致发射引发的爆炸电子发射、或者场致增强的热发射, 与传导期中多隙电极系统的静电聚焦效应, 作为电子束源, 赝火花放电室产生相当小束径(不大于 1 mm)、强流密度($10^6 \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2}$)、极低发射度($\epsilon_n \sim 15 \text{ mm mrad}$)和可与光阴极产生的电子束亮度相比的高亮度($B_n \sim 10^{12} \text{ A/(m}^2 \text{rad}^2)$)的磁自箍缩的电子束, 而且在低压中性气体的电离通道中可传输相当远的距离。近十多年来, 一些工作在较低电

* 国家自然科学基金资助的课题。

[†] 现在通讯地址: 中国科学院高能物理研究所应用部, 北京 100080。

压(<100 kV)的火花放电产生电子束的实验已有许多报道^[1-3],但高于 100 kV 的电子束产生则甚为少见. 美国马里兰大学 Destler 研究小组于 93 年 4 月报道了有关利用脉冲线加速器驱动 10 隙空心阴极火花放电室产生高于 100 kV、强流密度、高亮度电子束实验结果^[4]. 国内尚未见到高于 100 kV 电压下火花电子束产生的报道.

传统的热阴极能够产生相当低的能散度的电子束,束流强度却低于 $100 \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2}$;冷阴极可提供较强的束流强度,能散度却相当高,利用引导场约束电子束却又激起束表面脉动和一些不稳定性. 过去自由电子激光器存在着诸如效率低等一些难题,基本上不是由于它的技术问题或有关的理论问题,而是由于所用的电子束的质量不佳. 火花产生的电子束的优良束质:强流密度、低能散度、高亮度特性,正好满足改善电子束质量进而提高自由电子激光器的效率和缩短波长的要求.

正是为了改善本实验室喇曼自由电子激光器所用的冷阴极电子束的束质以提高其效率和进一步缩短波长,作者设计了工作在高电压(大于 100 kV)下的 10 隙高亮度火花电子枪. 10 级 Marx 发生器产生的高脉冲电压,经改进了的脉冲线加速器,驱动火花放电室产生高束质量的电子束^[5]. 本文则报道该电子束源的实验结果.

2 实 验 装 置

利用火花放电原理产生高功率、高亮度电子束源的总体实验装置如图 1 所示.

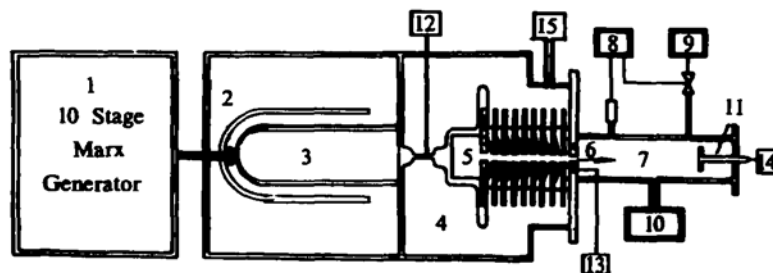


图 1 火花放电室作为高亮度电子束源总体实验装置图

1. Marx 发生器, 2. 短接主开关, 3. 脉冲线加速器, 4. 高真空室, 5. 火花放电室, 6. Rogowski 线圈, 7. 漂移管, 8. 自动压强控制仪, 9. 气源, 10. 机械泵, 11. 轴向可移动测量装置, 12. OK-19 示波器, 13. Tek. 485 示波器, 14. Hitachi 示波器, 15. 真空扩散泵

火花放电室、漂移管的设计参数以及改进后的脉冲线加速器工作参数如表 1 所示.

表 1 改进型脉冲线加速器, 火花放电室以及漂移管的工作和设计参数

改进型脉冲线加速器:		火花放电室:	
工作电压范围	100 - 500 kV	阴-阳极距离	2 - 10 cm
电流范围	1 - 25 kA	隙间距	2 mm
脉冲宽度	1 - 3 μs	通道孔径	4 mm
漂移管:		阴极孔深	3 mm
内径	42 mm	空心阴极内径	30 mm
长度	50 cm	充气气压	4 - 20 Pa

脉冲线加速器通常工作在 450 kV, 45 kA, 60 ns. 为产生波形好、脉冲宽度大于 $1\ \mu\text{s}$ 的高压驱动脉冲, 将脉冲形成线(Blumlein 传输线)的主开关直接短路, 同时拆掉接地电感, 即将脉冲形成线用作水同轴电缆, 从而将 10 级马克斯发生器产生的高压脉冲输出直接加到负载——氙火花放电室. 由于高功率低阻抗器件, 所以在改进型的脉冲线加速器和氙火花放电室之间没有使用任何匹配电阻. 修改后的脉冲线加速器可工作在 100—450 kV, 1—40 kA, 1—3 μs . 10 隙氙火花放电室的空心阴极和阳极的距离为 10 cm, 有效隙距 2 mm, 共同的中心放电通道直径 4 mm. 基于高电压、低电流阶段中发生于空心阴极中的空心阴极效应和阴极孔附近的爆炸电子发射, 以及多隙电极中的静电聚焦效应, 在恰当的空间电荷限制流和空间电荷中和条件下, 一个磁自箍缩的电子束从阳极孔射出, 在 50 cm 漂移管中传输.

氙火花放电室安装在脉冲线加速器的高真空室中. 二级真空扩散泵将高真空室抽至 10^{-3}Pa 以下, 防止高电压加上时低气压室发生室外闪络. 机械泵将氙火花放电室抽至 1Pa, 然后由自动压强控制仪将工作气压控制在设定值, 自动压强控制仪则通过控制压电阀动态地调节室内低气压稳定在设定值上. 工作气压在 4—20Pa 之间可调. 低气压放电室中充以氮气.

设计和标定好的 Rogowski 线圈、法拉第杯、以及发射度计用以测量氙火花电子束的质量. Rogowski 线圈嵌在阳极口测量出射电子束的束流强度和脉冲宽度, 法拉第杯和发射度计安装在可

移动杆上, 测量在漂移管内中性气体中传输的电子束沿轴向各点的束流强度和发射度. 电子束的能量和束斑由 0.05 mm 厚铜箔和酸敏纸测量.

3 实验结果与讨论

由 Marx 发生器产生、通过修改了的脉冲线加速器、加在氙火花放电室空心阴极的驱动电压波形使用 OK-19 示波器拍摄后测量. 观测表明, 驱动电压脉冲的波形很好, 脉冲前沿陡, 顶部平, 最大值为 200 kV(90 kV/mm), 脉宽约 2.7 μs (0.3 $\mu\text{s}/\text{cycle}$). 嵌在阳极出口端的 Rogowski 线圈测出氙火花放电室内产生的电子束的束流强度波形如图 2 所示. 电子束束流强度 2.2 kA, 脉冲宽度 400 ns, 脉冲前沿小于 20 ns. 陡峭的脉冲前沿意味着在

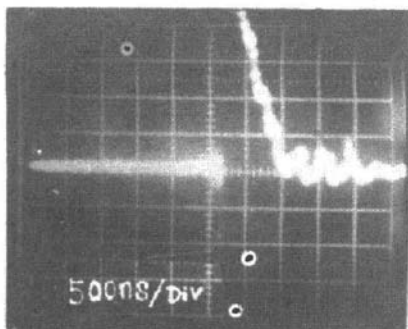


图 2 Rogowski 线圈测出的阳极口出射电子束的束流强度波形 峰值电流强度 2.2 kA (625 A/div), 脉冲宽度约 400 ns(0.5 $\mu\text{s}/\text{div}$)

空心阴极阶段中所产生的高能电子丰富, 即意味着从阳极出射的电子束在漂移管中可迅速地从中性气体中电离出一条等离子体通道, 在接近电荷中和与满足空间电荷限制流的条件下可传输较远的距离. 实验已经测得, 在上述条件下电子束传输 20 cm 未见明显的扩散. 图 3 给出该电子束在 15 Pa 氮气的等离子体电离通道中、阳极下游 5 cm 处连续打穿粘贴在一起的酸敏纸和厚 0.05 mm 铜箔的实物使用金相显微镜拍摄的放大照片. 酸敏纸紧贴在铜箔前面, 它不仅能记录整个电子束束斑的轮廓, 而且还

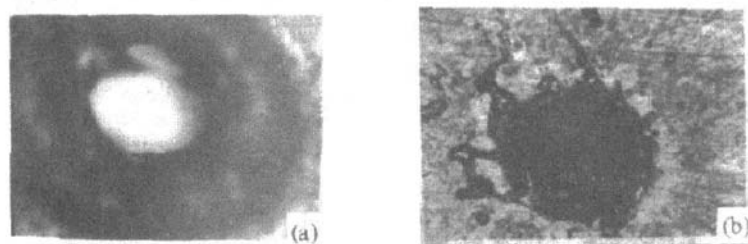


图3 强流电子束沿漂移管轴线在氮气中传输 5 cm 时相继打穿酸敏纸和铜箔的金相显微放大照片 (a)酸敏纸,穿孔直径:0.6 mm,放大倍数: 5×7.5 (b)0.05 mm 厚铜箔,穿孔直径:0.3 mm,放大倍数: 10×7.5

可以过滤掉部分低能电子而使高能电子束通过.图 3(a)所示为酸敏纸上记录的穿过它的电子束斑,直径约 0.6 mm;图 3(b)所示为留在铜箔上的高能电子束打穿的孔,直径近似 0.3 mm.前者放大倍数 5×7.5 ,后者放大倍数 10×7.5 .

仔细观察图 3(a),可以发现,由高电压(不小于 200 kV)驱动的 10 隙腰火花放电室产生的电子束的束斑图由一系列的同心圆或者椭圆条纹构成,这与参考文献[3]中所提供的低电压(小于 70 kV)多极板腰火花放电产生的电子束在硅靶上的轰击斑条纹一致.由这两个分立的实验所提供的类似证据可以断定,所谓实心腰火花电子束实际上是实心层状电子束,即由一系列层状电子束构成,至少对于多隙腰火花放电产生的电子束是这样的,虽然迄今尚未观察到单隙腰火花放电产生的电子束具有这种层状束结构.

由 5 cm 处铜箔上极小的高能电子束半径和所测电流可以计算该处电子束的发射度和亮度.高能电子束在低压中性气体中可传输很长距离,保持束径无明显的变化,归因于电子束中沿径向两个方向相反的作用力的平衡,即由于束自身空间电荷引起的方向向外的库仑斥力和由于束自身携带的强流引起的方向向内的磁箍缩力的平衡.根据磁自箍缩的径向力平衡条件,可以算出电子束的归一化发射度和亮度.平衡束半径公式为^[6]:

$$r^2 = \frac{\epsilon_n^2}{\beta^2 \gamma^2 \kappa}, \quad (1)$$

式中, $\epsilon_n = \beta \gamma \epsilon$ 为归一化发射度, ϵ 为均方根发射度, κ 为广义导流系数:

$$\kappa = \frac{2I}{I_A \beta^2 \gamma^2} (f_e \gamma^2 - 1), \quad (2)$$

式中, $I_A = 17$ kA, 为阿尔文电流, f_e 为空间电荷中和因子.电子束的归一化亮度定义为:

$$B_n = \frac{2I}{\pi^2 \epsilon_n^2}. \quad (3)$$

已知 $U = 200$ kV, 所以 $\gamma = 1.4$, $\beta = 0.7$; 由 5 cm 处束斑半径(铜箔上高能电子束穿孔半径) $r = 0.15$ mm, $I \approx 2$ kA, 假设电离通道内空间电荷已完全中和, 即 $f_e \approx 1$, 代入公式(1), (2), (3), 求得阳极下游沿漂移管轴线 5 cm 处电子束的归一化发射度为: $\epsilon_n \approx 23 \pi$ mm mrad, 归一化亮度为: $B_n \approx 8 \times 10^{10}$ A/(m rad)².

综上所述,与本实验室喇曼自由电子激光器原先所使用的冷阴极电子束参数^[7](加速电压 450 kV, 束流 1 kA, 电压脉冲宽度 60 ns, 归一化发射度 230π mm mrad)相比,腰火

花放电产生的电子束的束质量要好得多: 火花放电室的驱动电压波形极好; 工作电压 200 kV 时, 束流强度高得多 (2.2 kA), 脉冲宽度提高几乎一个数量级 (400 ns), 发射度降低一个数量级 ($23 \pi \text{ mm mrad}$), 可与光阴极发射的电子束亮度比拟的亮度 ($8 \times 10^{10} \text{ A/(m rad)}^2$); 根本不用引导场, 即可在低压中性气体中传输很远 (20 cm). 该电子束的其他特性正在进一步测量之中. 火花电子束的良好束质为喇曼自由电子激光器进一步提高效率、缩短波长、小型化和气载化以及抽运软 X 射线激光器开辟了新途径.

- [1] J. Christiansen *et al.*, *Z. Phys.*, **A290**(1979), 35.
- [2] K. K. Jian *et al.*, *Phys. Fluids*, **B10**(1990), 2487.
- [3] X. L. Jiang *et al.*, *Rev. Sci. Instrum.*, **63**(1992), 2420.
- [4] W. W. Destler *et al.*, *Appl. Phys. Lett.*, **62**(1993), 1739.
- [5] Zhu Junbiao *et al.*, *Chinese J. Lasers*, **5**(1994), 427.
- [6] J. D. Lawson, *The Physics of Charged-particle Beams*, (Clarendon Press, Oxford, 1977), p. 195.
- [7] 褚 成等, *中国科学*, **A9**(1986), 992.

HIGH-POWER, INTENSE-CURRENT-DENSITY, LOW-EMITTANCE, HIGH-BRIGHTNESS PSEUDOSPARK ELECTRON BEAM DRIVEN BY IMPROVED PULSE LINE ACCELERATOR

ZHU JUN-BIAO WANG ZHI-JIANG ZHANG LI-FENG

LU ZAI-TUN HUANG YU WANG MING-CHANG

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica, Shanghai 201800)

(Received 28 February 1995)

ABSTRACT

High-power (200 kV), intense-current-density, low-emittance, high-brightness electron beam was generated in a 10 gap pseudospark chamber filled with 15 Pa N_2 and driven by an improved pulse line accelerator. The ejected electron beam was characterized by 1 mm diameter, 2.2 kA beam current, and 400 ns pulse length, and propagated 20 cm in neutral N_2 ionizing channel in the drift tube. At 5 cm downstream of the anode, it penetrated consecutively an acid-sensitive discoloring film and a 0.05 mm-thick copper foil, and left 0.6 mm and 0.3 mm holes on them, separately. According to the pinching equilibrium condition, the beam's normalized emittance and brightness are respectively calculated to be $23 \pi \text{ mm-mrad}$ and $8 \times 10^{10} \text{ A/(m rad)}^2$. That the 10 shots on the same acid-sensitive film produced a hole of 1.6 mm in diameter at 7 cm showed a good repeatability of the electron beam. After 60 shots the pseudospark chamber was observed that there was almost no destructive damage traces left on the surfaces of the electrodes and insulators. It was found that the quality of electron beam produced in the pseudospark discharge chamber driven by the modified pulse line accelerator is much better than that generated by cold cathode discharges.

PACC: 4180D; 5280; 2925; 4255T