

新型毫微秒强流脉冲电子束和 离子束发生装置

江兴流 陈克凡 朴禹伯

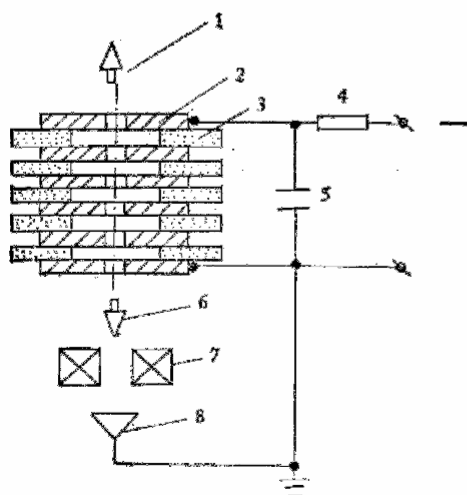
(兰州大学现代物理系)

1982年11月29日收到

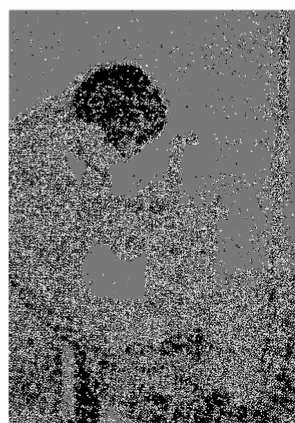
提 要

本文讨论一种新的低气压放电型粒子源,用这种装置可以产生能量达70keV,电流密度超过 10^6A/cm^2 ,电流为几百安培的脉冲电子流和安培级的脉冲离子流。作者建议用“电场递增效应”来解释这种多极板放电室的放电机制。由于它造价低、结构简单、重复频率高、寿命长,可以预期,这一装置将会得到广泛应用。

六十年代初期以来,相对论电子束和脉冲离子束的研究有了很大的进展,它们在受控热核反应、泵浦气体激光、离子的集团加速、脉冲强X射线、光化学反应、微波的产生等方面的潜在应用,引起人们的极大注意^[1,2]。通常产生这种粒子束,需要复杂而庞大的设备,它包括 Marx 发生器、脉冲成形线、快速开关和“真空二极管”等。本文介绍一种新的低气压放电型的简单装置,用它产生达70keV、百安培级的脉冲电子束和安培级的离子束^[3]。



(a) 放电室接线图



(b) 放电室照片

图1 多极板放电室

1——放电室; 2——金属极板; 3——绝缘片; 4——充电电阻;
5——外接电容; 6——电子束; 7——罗柯夫斯基线圈; 8——法拉第筒。

一、实验装置

多极板放电室由绝缘片和金属片粘接而成(见图1),绝缘片和金属片的厚度为0.8—2mm 金属片中心孔径为0.5—2mm. 整个放电室置于真空(真空度应好于 2×10^{-4} Torr)或高压绝缘气体环境中,放电室内按实验目的分别充以气压为 10^{-2} —1Torr 的 H_2 , He, N_2 , Ne, Ar, 空气或其它气体,外加直流电源调到某一电压,改变气压到一定值时,放电室内产生放电,这时在阳极孔外测得时延为几十毫微秒的脉冲电子束,在阴极孔外测得脉冲离子束。

二、测量装置

采用带磁芯的罗柯夫斯基线圈测量脉冲电流,线圈的每一匝并联一阻值适当的阻尼电阻,其接法是: 各个电阻的一端依次接向线圈的每一匝的同一位置,另一端公共接地,从而形成一电感-电阻组成的分布长线,得到宽的响应频带. 图2为带磁芯罗柯夫斯基线圈方波响应的测试结果. 采用国产 SBM-14 型示波器进行观测,输入方脉冲的重复频率为300Hz.

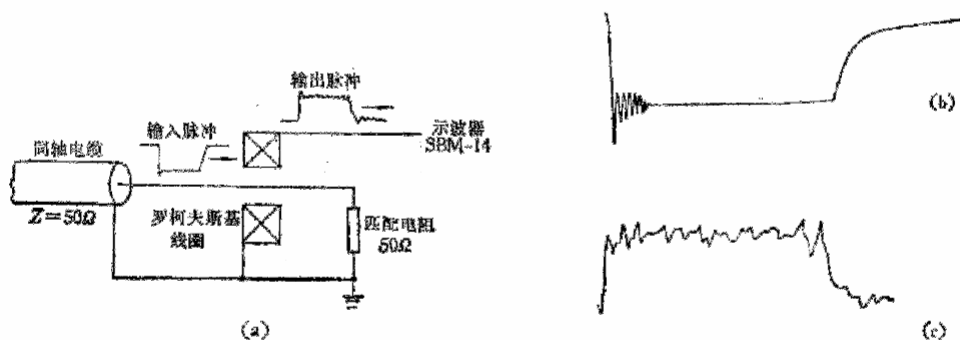


图2 (a) 为测试接线图, (b) 为输入方波, (c) 为输出波形

为了测量束流的包络线,在束流飞行的区间内放置铜片、聚酯薄膜等,以观察不同位置的束斑的变化。

三、放电机制讨论

目前有两种模型解释多极板放电室的放电机制. 一种是“等离子泡”模型: 认为在放电室轴向,在阴极 K 外存在一个等离子泡(见图3),当等离子泡爆发时,就射出一束强电子束,飞向阳极 $A^{[4]}$. 但实验证明,“等离子泡”不是脉冲电子束产生的先决条件,这一模型也难以解释许多有关的物理现象,例如,“等离子泡”是在什么条件下爆发;离子如何获得与放电室外加电压相对应的能量;没有考虑放电室内部几何条件的影响;放电室的绝

缘性能如何得以恢复等. 另一种是“电场递增效应”模型^[4], 这一模型所描述的主要物理过程是: 根据汤逊 (Townsend) 放电理论和巴中 (Paschen) 放电曲线^[5], 在多极板放电室中, 极板间隙放电借助中心孔道的连通, 在极短的时间内从阴极传递到阳极, 而外接电容 (图 1) 上的电压在这段时间内不能突变, 因而在阳极附近最后放电的一、两个间隙上出现很高的电场强度, 形成场致发射电子束, 场致发射电流密度 J_c 可由下式表示:

$$J_c = ASm^2E^2\exp\left(\frac{-B}{mE}\right), \quad (1)$$

式中 E 为间隙上的电场; S 为场发射区的面积; m 为表面微小突起物所产生的场强增强因子, 取决于电极表面的状况, m 的数值可达几百, 甚至更大; A 和 B 为由电极材料和形状所决定的常数.

当这最后一个间隙放电后, 高场强立即消失, 场致发射停止. 由于放电的“泵浦”作用, 放电室内的真空度瞬间提高, 放电室的电绝缘性能迅速恢复, 在电子束流示波图上 (见图 4), 能观察到指数上升的波前和骤然下降的后沿, 这种波形与“电场递增效应”模型的解释相吻合. 但当电子束流强度超过空间电荷限制电流时, 电流波与图 4 所示的波形不一致^[6], 此时, 将出现集团加速现象.

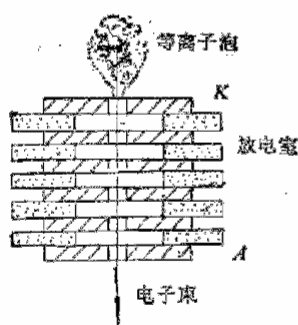


图3 “等离子泡”模型示意图

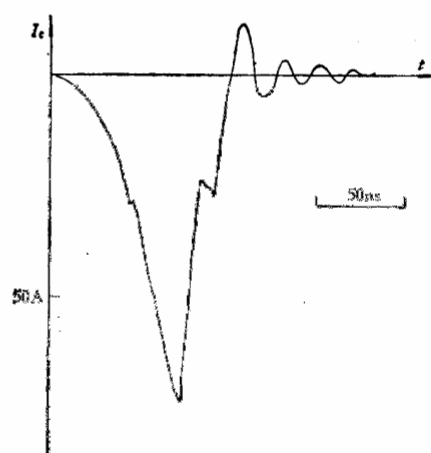


图4

四、实验结果

在16片电极放电室两端加上60kV电压, 通入约0.1Torr的空气, 此时, 放电重复频率约3Hz. 经7min后, 离阳极出口15mm处的一块厚0.14mm的铜片, 由于电子束的轰击, 出现一个微孔, 在显微镜下拍得的照片如图5所示. 可以看出, 电子束的束斑有相当好的定向性和重复性. 束径小于100 μ m, 估计电流密度大于10⁶A/cm², 功率密度超过10¹⁰W/cm². 当功率密度超过10⁹W/cm²时, 金属将发生升华过程^[7], 因此, 微孔部分的金属飞散, 不仅由于溅射、蒸发, 也有升华过程.

在阴极出口外3.5mm处的铜片上, 由于离子的轰击, 也出现直径约100 μ m的通孔,

许多文献讨论了电子束、离子束在低压气体中飞行时的箍缩现象^[8,9]。本实验中, 我们观察到的电子束和离子束束径小于电极孔径的 $1/14$, 由于空间电荷中和效应电子束在飞行了相当的一段距离后, 仍然存在箍缩现象, 例如, 离阳极出口 80mm 处的铜片上, 仍能观察到小于 $100\mu\text{m}$ 的束斑。许多实验结果表明^[10], 在气压为 0.1Torr 左右的空气中, 强流脉冲电子束具有最佳的箍缩效应, 这正与本实验条件相符。对于强流离子束, 在无外加电磁场的低压气体中飞行时, 既存在由于空间电荷中和时的磁自收缩现象^[9], 又存在气体分子对离子的散射作用, 当我们把铜片放在离阴极出口 20mm 处, 我们能观察到直径大于 1mm 的离子束斑。这里应该注意到离子在气体中的平均自由程 λ_i , 其值可由下式估算:

$$\lambda_i = [PS]^{-1}, \quad (2)$$

式中 P 为气体压力; S 为每厘米每托所发生的碰撞次数。

能量为 60keV 的质子在氢气中飞行时, $S \approx 10^{16}$, 若此时的气压为 0.1Torr , 则其平均自由程为 1cm 。氮的原子序数要比氢的原子序数大, 氮离子在 0.1Torr 空气中的平均自由程要比 1cm 短得多, 因此, 气体分子对氮离子的散射作用是很强的。

实验结果表明, 脉冲电子束和离子束的电流强度、持续时间、重复频率、束斑的大小与放电室的几何尺寸、外加电压、充电电阻、外接电容、回路等效电感、气体种类和压力等因素有关, 要找出其相互关系和内在规律, 还需要积累更多的实验数据。

五、结 语

利用多极板放电室, 我们成功地产生了脉冲电子束和离子束。由于它造价低、结构简单、重复频率高、能量转换效率高、寿命长等优点, 在作一定的改进和提高后, 它将在受控热核反应、泵浦气体激光、加速器技术等方面得到应用, 例如, 产生高电荷态的脉冲重离子束; 测量电子和各种离子在气体中的碰撞游离、电荷交换截面; 研究强流电子束、离子束在低压气体中的传输特性和箍缩现象。此外, 它在微加工、离子注入、表面处理、毫微秒强流快速开关等工艺技术领域中也得到应用。

本实验得益于纽伦堡大学 J. Christiansen 教授, C. Schultzeiss 博士和欧洲核研究中心的 I. Kamber, H. Riege 博士的有成效的讨论, 在实验中得到孙别和、雷存弟、牛占波和马永利等的帮助, 特此致谢。

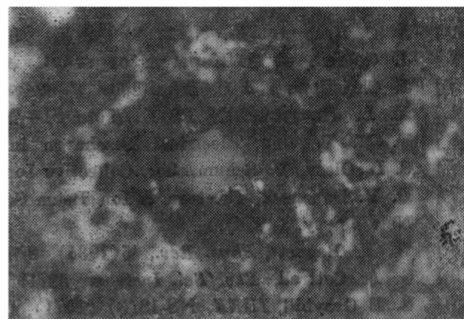


图 5 电子束轰击微孔显微照片 ($\times 100$)

实验条件: 外加电压为负 60kV , 充电电阻为 $220\text{M}\Omega$, 外接电容为 550pF , 电极孔径为 $\phi 1.4\text{mm}$

参 考 文 献

- [1] A. C. Kolb, *IEEE*, NS-22(3) (1975), 956.
- [2] J. Golden, C. A. Kapetanakis *et al.*, *American Scientist*, 69(1981), 173.
- [3] J. Christiansen & C. Schultheiss, *Z. Physik A*, 290(1979), 35.
- [4] X. L. Jiang, CERN PS/EI/Note 81—7(1981).
- [5] F. M. Penning, *Electrical Discharge in Gases*, Philips Technical Library, (1957).
- [6] C. L. Olson, U. Schumacher, *Collective Ion Acceleration*, New York, (1979), pp. 1—90.
- [7] D. V. Dobeneck, *Electron & Ion Beam Science & Technology*, Six International Conference, New Jersey, (1974).
- [8] W. H. Bennett, *Phys. Rev.*, 45(1934), 890.
- [9] G. A. Cottrell, *Rev. Sci. Instrum.*, 52(1981), 1174.
- [10] S. E. Graybill, *IEEE*, NS-18(3) (1971), 238.

A NEW TYPE OF PULSED ELECTRON AND ION SOURCE WITH A DURATION OF NANoseconds

JIANG XING-LIU CHEN KE-FAN PIAO YU-BO

(Department of Modern Physics, Lanzhou University)

ABSTRACT

This paper describes a new type of electron and ion source under low gas pressure. Pulsed electron beams with a current density greater than 10^6A/cm^2 with total current up to several hundred amperes and pulsed ion beams of the order of amperes were produced by this device. A model of the field escalation effect is proposed to explain the discharge mechanism in the multiplate chamber. It is expected that this device may have a lot of applications.