高电压虚火花电子束的发射度和亮度测量

黄 羽 王明常 王之江
(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

摘要 用脉冲线加速器作驱动电源, 在充以 15 Pa 的氮气十隙虚火花放电室中获得电压为 200 kV, 束流大于 2 kA 的高亮度电子束. 用罗格斯基线圈和多缝板与酸敏纸薄膜构成的发射度计, 测出距阳极不同距离电子束的电流强度, 发射度及亮度. 电子束亮度在阳极附近最大达到 2.7×10^{12} A/(m rad)^2, 在距阳极 16 cm 处仍高于 10^{10} A/(m rad)^2.

关键词 虚火花电子束 发射度 亮度

虚火花放电是一种低气压气体中的放电现象, 它产生的强流、高亮度电子束, 可以进行自由电子激光研究[1], 还可用于高功率开关和产生 X 射线[2]. 在电子束出射的相反方向, 还能产生一个强流离子束[3].

通常虚火花放电在虚阴极和平板阳极之间进行, 放电电压在 20~ 70 kV 之间[4, 5]. 为了得到高于 100 kV 的电压, 必须在阴极和阳极之间加上多个中间电极, 做成多隙虚火花放电室[6]. 我们用脉冲线加速器作驱动电源, 采用十隙虚火花放电室, 在 15 Pa 的氮气中获得电子束电压为 200 kV, 束流大于 2 kA, 束直径约几个毫米, 束流密度高达 3×10^5 A/cm^2[7].

为了测量虚火花电子束的特性, 我们采用罗格斯基线圈和多缝板与酸敏纸薄膜构成的发射度计, 测出距阳极不同距离电子束的电流强度、发射度及亮度.

1 实验装置

实验装置由马克斯发生器、脉冲形成线、虚火花放电室和测量系统等几部分组成[7]. 马克斯发生器共 10 级, 每级最多能提供 50 kV 的电压. 脉冲形成线为 Blumlein 水线. 为了获得一个微秒级的电压脉冲, 脉冲形成线作了如下修改, 其内外筒之间的电感被拆除, 中筒和内筒之间的主开关直接短路. 马克斯发生器经电源充电, 触发后产生约 200 kV 的输出电压, 经脉冲形成线后加在虚火花放电室上室.

虚火花放电室由空心阴级、阳极和中间电极及它们之间的绝缘圆盘构成. 用真空泵把虚火花放电室和漂移管内的气体抽到 1 Pa 以下, 再由自动压强控制系统向其中缓慢地注入氮气, 并稳定在 15 Pa.

2 测量原理和实验结果

发射度的定义见图 1, 在束流的某一截面上, 粒子的状态可用径向位置 r_i 和发射角 $\mathrm{d}r_i/\mathrm{d}z$ (或 r'_i) 来标记, 全部粒子在相平面$(r,\ r')$上构成一个椭圆, 发射度就是其面积 A 除以 π[8]:

$$\varepsilon = A/\pi, \tag{1}$$

在相平面$(r,\ r')$上, 实际的束流分布往往没有明显的边界. 为此, 在测量中引入百分比发射度, 如定义 $\varepsilon_{0.9}$为包含 90% 束流的边界面积除以 π. 还有一种半高半宽发射度 ε_e[8, 9], 由每个小光斑峰值的半高宽处截断, 确定边界坐标及发散角, 它包含了 58% 的粒子束在内.

为了对不同能量束流的发射度进行比较, 必须把粒子动量因子也考虑在内, 引入规一化发射度

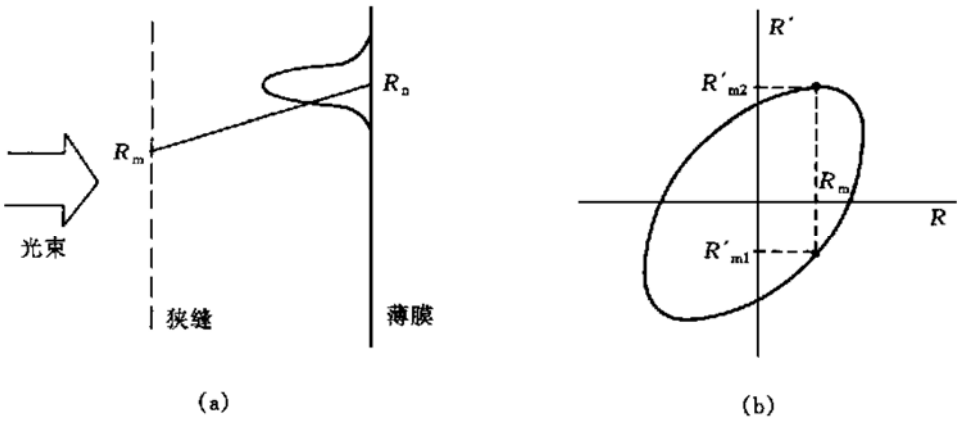

图 1 发射度测量示意图

(a) 束流的分束和测量; (b) 束流的相平面图

$$\varepsilon_n = \beta\gamma\varepsilon_e, \tag{2}$$

其中 $\beta = v/c$, v 是粒子速度, $\gamma = (1-\beta^2)^{-1/2}$是相对论因子.

粒子束的规一化亮度定义为

$$B_n = 2I/(\pi^2\varepsilon_n^2), \tag{3}$$

其中 I 是电流强度.

我们在阳极外的可移动杆上装上多缝板和酸敏纸薄膜来测量电子束的相面积, 缝的宽度为 0.15 mm, 缝与缝之间的中心距离为 0.6 mm, 板的厚度为 1 mm. 电子束打在多缝板上, 分成若干条片状电子束, 这些电子束通过 L 的距离后, 打在酸敏纸上, 留下束斑, 通过测量束斑的透射率分布, 可得到电子束的强度分布. 图 2(a) 是距阳极 5 cm 处的电子束强度分布, 由每个小束斑峰值的半高宽确定边界坐标及发射角. 在相平面上画出发射度椭圆(见图 2(a)), 可以求出相面积 A 为 153 mm•mrad, 电子束的半高半宽发射度 $\varepsilon_e \approx 48$ mm•mrad, 能量为 200 keV 的电子的相对论因子 $\gamma = 1.39$, $\beta = 0.70$, 因此电子束的规一化发射度 $\varepsilon_n = 47$ mm•mrad.

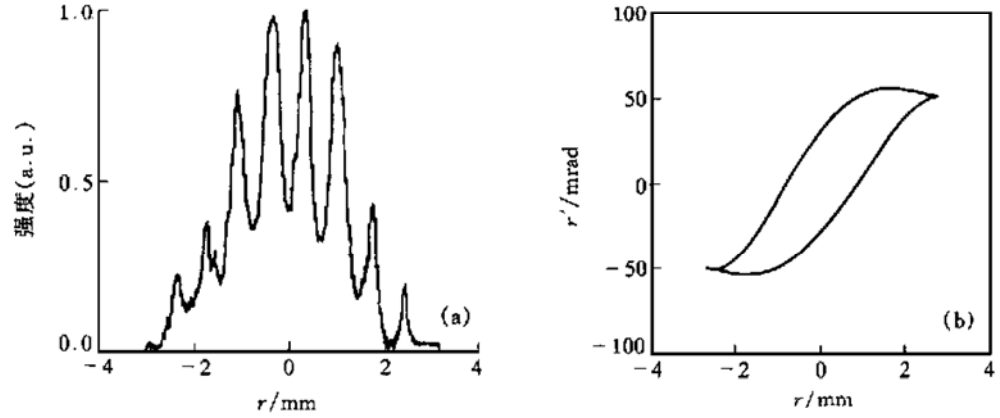

图 2

(a) 距阳极 5 cm 处酸敏纸薄膜中心线上强度分布曲线; (b) 半高半宽发射度相图

图 3(a) ~ (d) 分别是距阳极不同距离的电子束电流强度、半高半宽发射度, 规一化发射度及规一化亮度. 电流强度在距阳极 10 cm 以外的位置开始有明显的减小. 亮度在阳极附近最

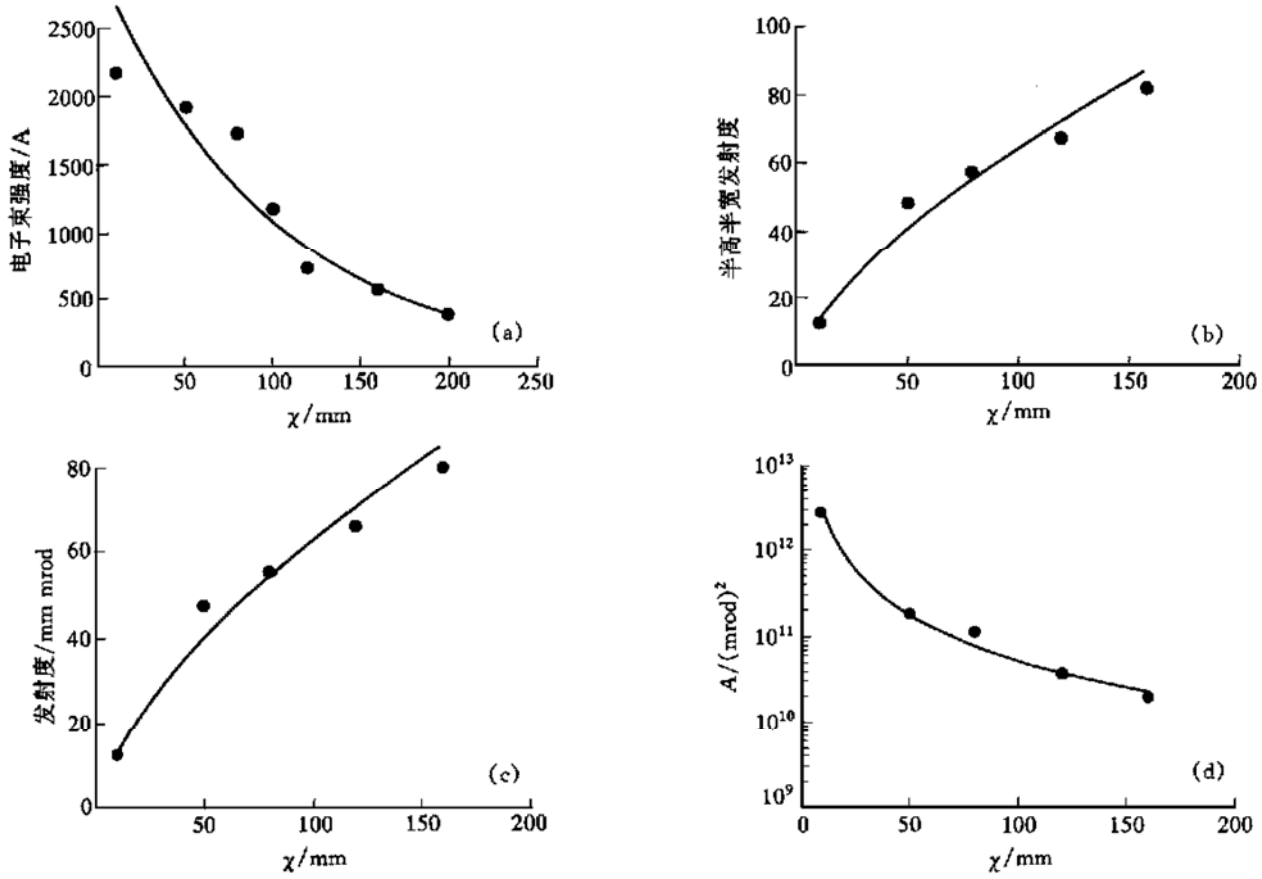

图 3 距阳极不同距离的电子束参数

(a) 电流强度; (b) 半高半宽发射度; (c) 规一化发射度; (d) 规一化亮度

大达到 2.7×10^{12} A/(m rad)^2, 在距阳极 16 cm 处仍高于 10^{10} A/(m rad)^2. 如此高质量的电子束可以和光阴极产生的电子束相比拟, 完全满足自由电子激光器的要求, 还可用于泵浦 X 射线激光和高功率微波的研究.

致谢 本工作为国家自然科学基金(批准号: 69337010) 资助项目.

参 考 文 献

1 Wang M C, Zhu J, Wang Z, et al. Design of the pseudospark discharge for a Raman FEL. Nucl Instr and Meth A, 1995, 358: ABS 38

2 Frank K, Christiansen J. The fundamentals of the pseudospark and its applications. IEEE Trans, Plasma Sci, 1989, 17(5): 748

3 Bauer W, Brandelik A, Citron A. Pseudosparkion diodes. Laser and Particle Beams, 1987, 5(4): 581

4 Rhee M J, Ding B N. Breakdown voltage characteristic of a pseudospark device. Phy Fluids B, 1992, 4(3): 764

5 Rhee M J, Liu C J. Generalized breakdown voltagecharacteristic of the pseudospark. Appl Phys Lett, 1994, 65(26): 3 314

6 Destler W, Segalov Z, Rodgers J. High power highbrightness electron beamgeneration in a pulse line driven pseudospark discharge. Appl Phys Lett, 1993, 62(15): 1 739

7 王明常, 朱俊彪, 王之江, 等. 虚火花电子束源研制成功. 光学学报, 1995, 15(2): 255

8 惠钟锡, 杨震华. 自由电子激光. 北京: 国防工业出版社, 1995. 218~ 222; 371~ 376

9 祝大军, 黄孙仁, 刘锡三. 脉冲电子束发射度在线测量. 强激光与粒子束, 1991, 3(4): 512

(1996-12-04 收稿, 1997-07-21 收修改稿)