

高亮度虚火花电子束发射度的测量*

黄 羽 王明常 张立芬 陆 宾 冯诚士 周慧芬

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

摘 要 介绍了对一台脉冲线加速器驱动虚火花放电装置产生的电子束发射度的测量工作。在十隙虚火花放电室中充以 15 Pa 的氮气, 产生能量为约 200 keV、束流 2000 A、直径为 1 mm 的高亮度电子束。在距阳极 5 cm 处测得电子束的均方根发射度 $\epsilon_{rms} \approx 48 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$, 规一化发射度 $\epsilon_n \approx 47 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ 。

关键词 虚火花放电, 发射度。

1 引 言

在自由电子激光器中, 为了保证电子束和辐射几何上的最大重叠, 要求电子束的非规一化发射度 ϵ 与辐射波长 λ 相当。为了提高自由电子激光器的输出功率, 要求电子束有很高的亮度 ($\geq 10^{11} \text{ A}/(\text{mrad})^2$), 这也要求电子束有低的发射度。提高电子束的质量已经成为自由电子激光器研究的首要问题, 目前洛斯·阿拉莫斯国家实验室采用光阴极电子枪得到规一化亮度 B_n 高于 $10^{11} \text{ A}/(\text{mrad})^2$ 的高亮度束流^[1]。近年来的研究表明, 虚火花放电能产生低发射度、高亮度的强流电子束。虚火花放电是 Christiansen 首先发现的一种低压气体中在平板阳极和虚阴极之间的放电现象^[2], 实验发现放电电压在 20~50 kV 之间, 电子束发射度小于 $100 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$, 亮度高达 $10^{12} \text{ A}/(\text{m} \cdot \text{rad})^{2[3]}$ 。这些实验是在由一个虚阴极和一个阳极构成的单隙虚火花放电室进行的, 单隙虚火花放电电压限制在 70 kV 内。美国马里兰大学在阴极和阳极之间加上多个中间电极和绝缘圆盘, 做成多隙虚火花放电室, 能得到更高的电压^[4]。相对于光阴极电子枪, 虚火花放电装置造价低廉, 不需要高真空度, 而且放电是在阴-阳极小孔通道中进行, 放电粒子不直接轰击阴-阳极, 因而虚火花放电室的使用寿命很长, 对于拉曼自由电子激光器, 它是理想的电子束源。中国科学院上海光机所研制的脉冲线加速器驱动虚火花放电装置, 采用十隙虚火花放电室, 在 15 Pa 的氮气中获得电子束的能量为 200 keV, 束流约 2 kA, 脉宽为 400 ns。电子束在阳极下游 5 cm 处打穿厚度约 0.05 mm 的铜箔, 留下直径小于 1 mm 的小孔, 束流密度高达 $3 \times 10^5 \text{ A}/\text{cm}^{2[5]}$ 。本文制作了发射度计来测量虚火花电子束的发射度。

2 测量原理

* 国家自然科学基金资助课题, 基金号 69337010。

收稿日期: 1995 年 7 月 18 日; 收到修改稿日期: 1995 年 11 月 10 日

发射度的定义如图 1 所示, 在束流的某一截面上, 粒子状态可用径向位置 r_i 和发射角 dr_i/dz (或 r'_i) 来标记, 全部的电子在相平面 (r, r') 上构成一个椭圆, 发射度 ϵ 就是椭圆面积 A

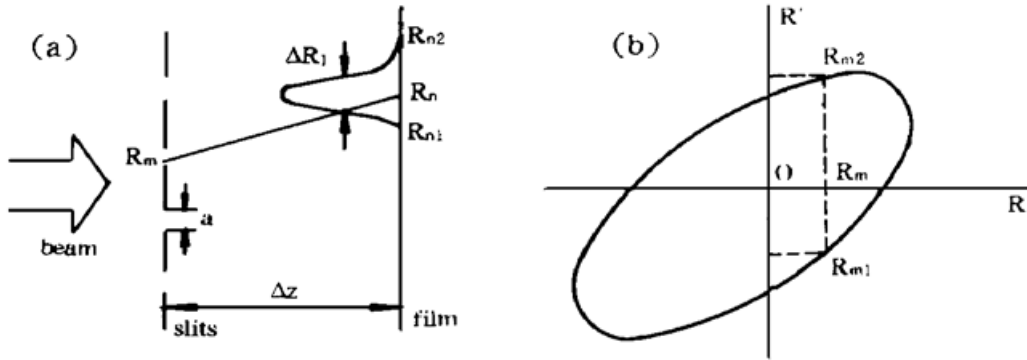


Fig. 1 Schematic of emittance measurement

(a) Divergence and measurement of the beam, (b) Beam current phase chart

除以 π^{61} ,

$$\epsilon = A / \pi. \tag{1}$$

测量电子束的相面积的方法通常是让电子束通过多孔板或者多缝板, 在其后放置接收屏。

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 ϵ_n

$$\epsilon_n = \beta \gamma \epsilon, \tag{2}$$

式中 $\beta = v/c$, v 是粒子速度, $\gamma = (1 - \beta^2)^{-1/2}$ 是相对论因子。根据刘维定理, 在理想情况下, 粒子无论在加速或在输运过程, 其规一化发射度不变。

只有当束具有明显边界, 为绝对均匀空间分布时, 才能测出边界清晰的相椭圆。但是在实际情况中, 束边界模糊, 分布也不均匀, 为了表征束流的分布 $\rho(r, r')$ 对发射度的影响, 引入均方根发射度 ϵ_{rms} 的概念⁷¹,

$$\epsilon_{rms} = 4(\langle r^2 \rangle \langle r'^2 \rangle - \langle r r' \rangle^2)^{1/2}, \tag{3}$$

式中 $\langle \Phi \rangle = \int \Phi \rho(r, r') dr dr'$, $\rho(r, r')$ 是粒子在相空间的分布函数。

实验用多缝板和酸敏纸 X 光感光胶片来测量电子束的相面积, 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 ΔZ 的距离后, 打在酸敏纸上, 留下束斑。用黑度计读出酸敏纸的黑密度分布, 就可以得到束流的分布, 求出相椭圆面积。

3 发射度的测量

整体实验装置如图 2 所示, 由马克斯发生器、脉冲形成线、虚火花放电室、压强控制系统及电子束测量系统构成。马克斯发生器共十级, 每级可充的最高电压为 50 keV, 脉冲形成线为充去离子水的 Blumlein 传输线。虚火花放电室由一个空心阴极, 9 个中间电极及绝缘圆盘和一个阳极构成。一个真空压强自动控制仪用来测量放电室的压强, 并通过压电陶瓷调节进气阀的大小来控制压强。马克斯发生器经电源充电, 触发后通

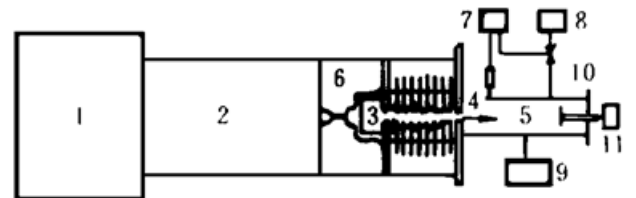


Fig. 2 Configuration of experiment setup.

1. Marx generator; 2. Pulse forming line; 3. Pseudospark discharge chamber; 4. Rogowski coil; 5. drift tube; 6. high vacuum chamber; 7. automatically pressure controlling device; 8. gas source; 9. vacuum pumping system; 10. movable measurement setup; 11. oscilloscope

过电容器串联产生约 200 kV 的输出电压, 经脉冲形成线后加在虚火花放电室上, 产生的强电流密度、低发射度的电子束从阳极口射出。

发射度计安装在阳极后面的可移动杆上, 发射度计由多缝板和酸敏纸组成。多缝板材料为不锈钢, 板的厚度为 1 mm, 缝宽度 a 为 0.15 mm, 缝的长度大于电子束的直径, 缝与缝之间的中心距离为 0.6 mm, 多缝板距阳极 5 cm。为了让缝成像后互不重叠和减轻空间电荷的影响, 要求酸敏纸与多缝板间距不能太远, 但太近不能保证测量的精度, 实验取它们的距离 ΔZ 为 6 mm。于是得到电子束在酸敏纸上的图像后, 在黑度计下测出其黑度的分布, 绘出电子束的相图, 由此计算发射度。

电子束在酸敏纸上留下的图像必需足够强才能被黑度计测出读数, 因此让电子束通过多缝板在酸敏纸上连续打五枪。图 3 是电子束经过多缝板后在酸敏纸上的成像, 图 4 是沿着图 3 条纹的垂直平分线测出的相对黑度分布。在缝宽度 a 为 0 的理想情况下, 应取条纹的 1/2 最大黑密度的全宽 Δr_1 除以 ΔZ 作为发射角增量 $\Delta r'$ 。然而, 实际上缝有一定的宽度, 本文采取简单的处理方法, 用 $(\Delta r_1 - a)$ 代替 Δr_1 。由此得到的电子束的发射度椭圆如图 5 所示, 可以求出相面积 A 为 $153 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$, 电子束的均方根发射度为 $\epsilon_{ms} \sim 48 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ 。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 $\epsilon_n = \beta\gamma\epsilon_{ms} = 47 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ 。

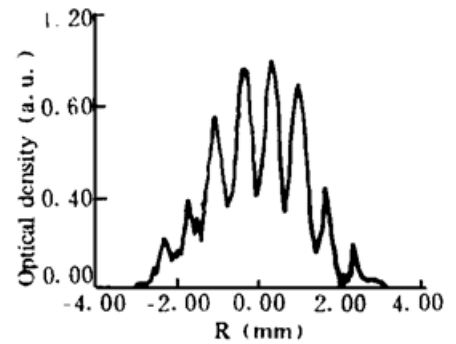


Fig. 3 Film after exposure to the beamlets through the slits

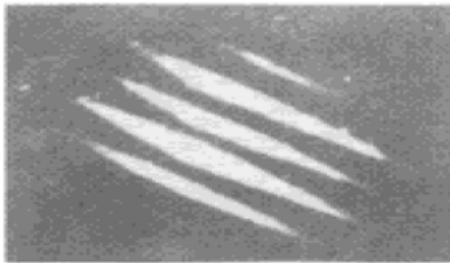


Fig. 4 Relative optical density distribution

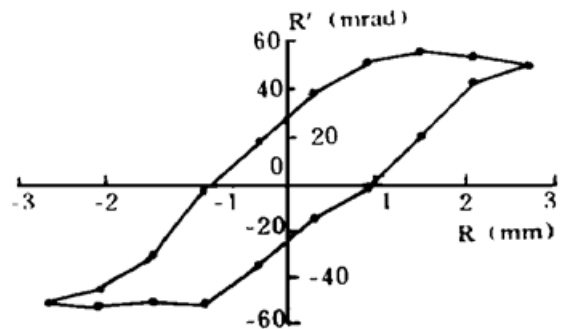


Fig. 5 Phase chart of half-high width emittance

注意这里测量的是五枪电子束叠加后的发射度, 因此实际的结果应该更小, 缝宽度 a 不为零也给实验带来了一定的误差。另外虚火花电子束的自箍束效应使得空间电荷产生的误差变得很小。

结束语 本文用多缝法首次测量了能量高达 200 keV 的虚火花放电电子束的发射度, 对了解虚火花电子束的束流品质有重要意义。在酸敏纸接受五枪, 结果偏大的情况下, 测得均方根发射度为 $\epsilon_{ms} = 48 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$, 规一化发射度 $\epsilon_n = 47 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ 。如此高质量的束流可以满足自由电子激光器的要求, 还可用于泵浦 X 射线激光和回旋管的研究。进一步的工作将包括提高电子束的能量和测量束流的传输特性。

本所刘亚青测量了酸敏纸的黑度, 作者深表谢意。

参 考 文 献

- [1] P. G. O'Shea, S. C. Bender, B. E. Carlsten *et al.*, Performance of the APEX free-electron laser at Los Alamos National Laboratory, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, (A)*, 1993, **331**(1): 62~ 68
- [2] J. Christianse, C. Schutheiss, Production of high current particle beams by low pressure spark discharges. *Z. Phys. (A)*, 1979, **290**(1): 35~ 41
- [3] M. J. Rhee, E. Boggasch, Emittance measurement of a pseudospark-produced electron beam. *Physics and Applications of Pseudospark*. New York, Plenum Press, 1990: 343~ 348
- [4] W. W. Destler, Z. Segalov, J. Rodgers *et al.*, Highpower, high brightness electron beam generation in a pulse line driven pseudospark discharge. *Appl. Phys. Lett.*, 1993, **62**(15): 1739~ 1741
- [5] 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~ 255
- [6] 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~ 518
- [7] K. K. Jain, E. Boggasch, M. Reiser *et al.*, Experimental investigation of a pseudospark-produced electron beam. *Phys. Fluids (B)*, 1990, **2**(10): 2487~ 2491

Emittance Measurement of a High Brightness Pseudospark-Produced Electron Beam

Huang Yu Wang Mingchang Zhang Lifen Lu Bin
Feng Chengshi Zhou Huifen

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy Sciences, Shanghai 201800)

(Received 18 July 1995; revised 10 November 1995)

Abstract We report the emittance measurement of a electron beam produced in a pseudospark discharge device driven by a pulse line accelerator. A ten-gap pseudospark device was operated at 200 kV, with anitrogen gas fill presure of 15 Pa. Small diameter (~ 1 mm) electron beam with current about 2 kA has been generated. The rms emittance of the beam is measured to be $\epsilon_{rms} \approx 48$ mm \cdot mrad about 5 cm downstream of the anode plane. The normalized emittance is then found to be $\epsilon_n \approx 47$ mm \cdot mrad.

Key words pseudospark discharge, emittance.