

新型电子束源——虚火花放电室设计*

朱俊彪 王明常 王之江 J.K. Lee**

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

(* * Pohang Institute of Science and Technology, Korea)

摘 要 提出一种新型的脉冲线加速器驱动的高功率、强流密度、低发射度、高亮度电子束源——虚火花放电室的初步设计。基于空心阴极效应和虚火花放电经验公式, 确定了空心阴极, 多隙阴-阳极距离, 以及工作气压范围。最后提出关于虚火花产生高亮度电子束源的总体实验方案。

关键词 虚火花, 空心阴极, 高亮度。

1 引 言

虚火花放电是在虚火花放电室(Pseudospark Chamber, PSC)中发生的轴对称高电压(几十kV~几百kV)、低气压(1 Pa~100 Pa)的气体放电现象。放电室有共心放电通道的空心阴极与平板阳极之间插入单块绝缘子构成的单隙虚火花放电室和交替插入绝缘子和中间电极构成的多隙虚火花放电室之分。整个放电过程分为三个时期: 预放电期, 空心阴极期(即高能低流电子束期)和传导期(即低能强流电子束期)。虚火花放电室可以产生相当窄的束直径(≤ 1 mm)、强流密度($> 10^4$ A/cm²)、极低的发射度(~ 15 mm mrad)、高亮度($\sim 10^{12}$ A/m²rad²)的磁自箍缩的电子束^[1~3]。由于阴-阳极小孔轴作为共同的放电通道, 加速粒子并不直接于轰击阴阳极, 导致虚火花室的寿命极长。

高效率、高功率的自由电子激光器迫切需要强流密度、极低发射度的高亮度电子束^[4], 而上述虚火花产生的电子束的优良束质正好满足这一要求。为此, 作者设计了高脉冲电压驱动的虚火花放电室。本实验室的高压脉冲线加速器(500 kV, 50 kA, 60 ns)经过改装可作为虚火花放电室的驱动电源。

2 空心阴极

如前所述, 最简单的虚火花放电室由空心阴极和平板阳极构成, 其间以绝缘子隔开。阴极和阳极中心开一小孔形成放电通道。实验和数值模拟表明, 工作在帕邢曲线左支的虚火花放电室之所以能产生强流电子束, 在于发生在空心阴极中和阴极孔附近的空心阴极效应, 即在相同工作条件下, 空心阴极结构能比平行平板结构产生高得多的电流密度。空心阴极效应

* 国家自然科学基金资助项目。

收稿日期: 1994年5月10日; 收到修改稿日期: 1994年7月18日

的产生条件近似为:

$$\varphi P < 133.3 \text{ cm Pa}, \quad (1)$$

其中, φ 是空心圆筒阴极的内径, P 是其中所充的气压。在预放电期间, 阳离子在强电场的作用下, 穿过放电通道和阴极小孔进入几乎没有电场的空心阴极内并在其中迅速积累形成一个轴对称等离子体——虚阳极。由于低气压下起主要电离作用的电子电离和离子电离导致该等离子体密度的迅速增长与体积的迅速膨胀, 虚阳极电势迅速增高直至高达 100 V~500 V, 从而电子电离几率达最大值。虚阳极与阴极之间的德拜鞘层厚度薄至某值($\sim \mu\text{m}$)而场强达某一极值($\sim 10^6 \text{ V/cm}$)时, 电离终止。等离子体内的正空间电荷被强电场加速下瞬时轰击加热阴极, 导致阴极产生大量的电子继而引起主放电发生。根据 Kirichenko 等人的实验^[5], 空心阴极效应发生在径向十几毫米范围内, 取空心圆筒的直径 $\varphi = 30 \text{ mm}$ 时, 为满足空心阴极效应条件, 所充的气压 P 取值应在 $4 \text{ pa} < P < 40 \text{ pa}$ 之间。

空心阴极区域中的任何瞬态电离过程依赖于其中局部电场。由于圆筒的屏蔽作用(除轴上小孔外), 空心阴极内几乎没有电场。显然外加电势引起的电场通过小孔贯入量的强弱依赖于阴极孔的直径和深度。Favor 等人的脉冲空心阴极放电实验^[6]表明, 在同样的条件下, 当阴极孔深不变而孔径增大时, 击穿时间延迟与抖动得以改善; 当孔径不变而孔深减小时, 击穿时间延迟和抖动同样得以改善。据此所设计的空心阴极尺寸取为孔径 5 mm、孔深 3 mm。

3 阴-阳极距离

由于绝缘材料表面吸附的气体在预放电期间的退吸而引起沿表面局部放电, 以及三相点附近局部场增强导致击穿, 单隙虚火花放电室的截止电压约在 20 kV~50 kV 之间。为设计耐高电压的虚火花电子束源, 必须考虑多隙结构。一般说来, 平行平板放电室在辉光放电时, 击穿电压 U_b 与阴-阳极距离 d 和所充气压值 p 的乘积的关系服从帕邢实验定律, $U_b = f(Pd)$ 。而虚火花放电工作在帕邢曲线最小值的左支, 实验证明, 其击穿关系极大地偏离了帕邢定律。美国马里兰大学的 Rhee 研究小组, 根据大量实验数据, 得到击穿电压 U_b 与阴-阳极距离 d 和所充气压 P 的关系为^[7]:

$$U_b(P, d) = \alpha / (P^\beta d)^\delta \quad (2)$$

其中, $\alpha = 0.1865 \pm 0.0019$, $\beta = 1.9952 \pm 0.0064$, $\delta = 2.226 \pm 0.016$, 可见 $\beta \approx 2$ 。给定 $U_b = 100 \text{ kV} \sim 500 \text{ kV}$, 利用简单的数值模拟, 求得阴-阳极距离 d (不包括空心阴极筒长)与隙内所充气压 P 的关系如图 1 所示。

由图 1 可见, 在加速电压给定的情况下, 阴-阳极距离随气压的减小而增加; 而随着电压的增加, 当阴-阳极距离不变时, 所充气压值减小。所以, 由图可知, 在由修改了的脉冲线加速器所提供的电压范围内, 合适的气压取值范围是 $4 \text{ Pa} < P < 20 \text{ Pa}$, 阴-阳极距离的尺寸应选约为 2 cm~10 cm。对照公式(1)可知, 所取的数据范围满足空心阴极效应公式。结合空心阴极和阴-阳极距离的确定, 虚火花放电室设计如图 2 所示。

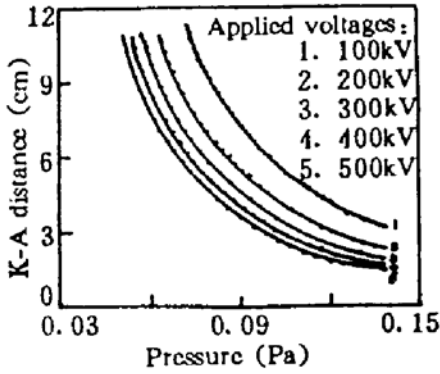


Fig. 1 The relation between the K-A distance and filled pressure of the Pseudospark chamber at given voltages

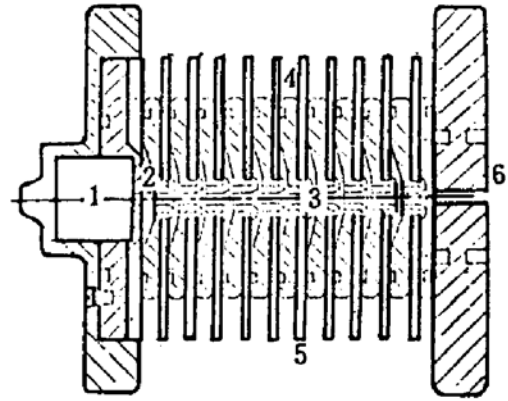


Fig. 2 Pseudospark discharge chamber

1. hollow cathode, 2. hollow cathode hole, 3. main discharge channel, 4. intermediate electrode, 5. insulator, 6. anode hole

4 总体设计

虚火花放电室作为强流密度、低发射度的高亮度电子束源的总体实验示意图如图 3 所示。修改后的脉冲线加速器，虚火花放电室和漂移管的设计参数如表 1 所示。

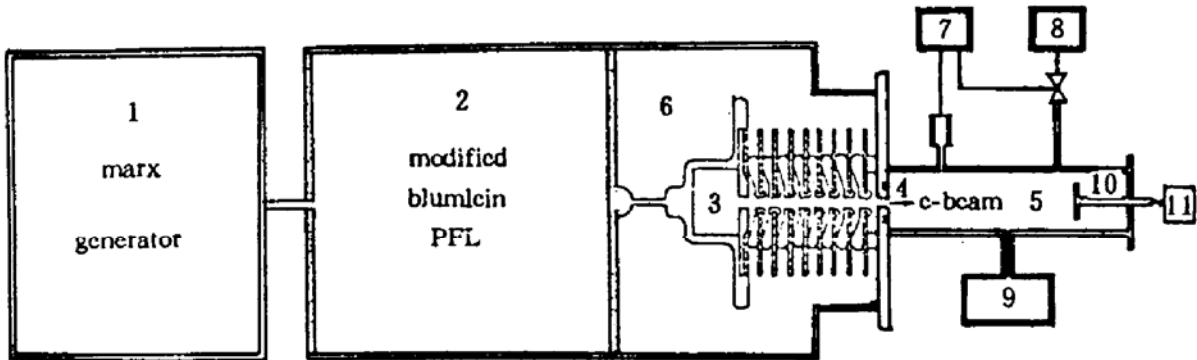


Fig. 3 Schematic of the general experiment with the PSC as a source of electron beam

1. Marx generator, 2. water coaxial Blumlein pulse line accelerator, 3. PSC, 4. Rogowski coil, 5. drift tube, 6. high vacuum chamber, 7. automatically pressure controlling system, 8. gas source, 9. 2-order vacuum pumping system, 10. axially movable measurement setup, 11. oscilloscope

Table 1. The parameters of modified PFL, PSC and drift tube

pulse line accelerator:	pseudospark chamber:
working voltage 100~500 kV	K-A distance 2~10 cm
current 5~25 kA	gap distance 2 mm
pulse duration ~1 μ s	channel aperture 4 mm
	cathode depth 3 mm
drift Tube:	HC internal diameter 30 mm
internal diameter 42 mm	pressure region 4~20 Pa
length 500 mm	

马克斯发生器(十级)由直流充电至高于 100 kV 的脉冲电压,触发放电后经修改了的脉冲线加速器直接加于多隙虚火花放电室。工作在低气压的空心阴极由于正的空间电荷的注入

与其内电子电离和电子雪崩，导致空心阴极效应进而引发多隙逐级电压击穿。每个中间电极靠近放电隙端装有绝缘子保护套，旨在屏蔽放电通道内各种电离产生的辐射线和各种逸出粒子对绝缘子的照射和轰击引致局部预放电。由于多隙电级的静电聚焦和加速作用，高功率、强流电子束射出阳极孔进入漂移管。在漂移管内，如果电子束满足空间电荷限制束流条件和迅速达到空间电荷中和，则具有极高束流强度，极小发射度的磁自箍缩电子束便可传输较远的距离而保持其特性基本不变。注入漂移管的净电流由嵌入阳极法兰盘的儒可夫斯基线圈测出。漂移管中传输的电子束的束流强度、束斑、发射度等由装在可移动杆端的法拉弟杯、酸敏纸以及发射度计测出。二级真空扩散泵用来抽空虚火花室和漂移管内的气体直到 1.33×10^{-3} Pa。一个自动压强控制系统用以控制室内所充的气压值。

致谢：本工作曾与美国马里兰大学 M. J. Rhee 教授、九院一所的丁伯南教授和兰州大学的江兴流教授进行了有益的讨论，王秀芬高级工程师提出自动压强控制系统，在此深表谢意。

参 考 文 献

- [1] J. Christiansen, Ch. Schutheiss, Production of high current particle beams by low pressure spark discharges. *Z. Phys. A*, 1979, **290** : 35~41
- [2] M. A. Gundersen, G. Schaefer, *Physics and Applications of Pseudosparks*. New York, Plenum Press, 1990 : 343
- [3] W. W. Destler *et al.*, High power, high brightness electron beam generation in a pulse-line driven pseudospark discharge. *Appl. Phys. Lett.*, 1993, **62**(15) : 1739~1741
- [4] C. W. Roberson, A review of free-electron lasers. *Phys. Fluids B*, 1989, **1**(1) : 3~42
- [5] V. I. Kirichenko *et al.*, Influence of dimensions, cathode material, and gas on the optimum pressure for a cylindrical hollow cathode glow discharge. *Sov. Tech. Phys. Lett.*, 1976, **21** : 1080~1086
- [6] M. Favor *et al.*, Dependence of cathode aperture in pulsed hollow cathode discharges. *Appl. Phys. Lett.*, 1992, **60**(1) : 32~34
- [7] M. J. Rhee, B. N. Ding, Breakdown voltage characteristic of a pseudospark device. *Phys. Fluids B*, 1992, **4** (30) : 764~765

Design of a New Electron Beam Source —— Pseudospark Chamber

Zhu Junbiao Wang Mingchang Wang Zhijiang J. K. Lee* *

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

(* * Pohang Institute of Science and Technology, Korea)

(Received 10 May 1994; revised 18 July 1994)

Abstract The preliminary design of a new pseudospark (PS) chamber —— high power, intense current density, lower emittance and high brightness electron beam source driven by a modified water —— filled Blumlein pulse-forming line is presented. Based on the hollow cathode (HC) effect and the pseudospark empirical formulis, various data including the HC and the cathode-anode distance, the working gas pressure region are given. The general experimental scheme of a high-brightness PS-produced electron beam source is shown.

Key words pseudospark, hollow cathode, high brightness electron beam.