

虚火花放电产生的强流脉冲电子束流 强度测量*

朱俊彪 王明常 王之江 张立芬

(中国科学院上海光机所, 上海 201800)

提要 介绍了用于最近成功运转的高功率, 强流密度, 低发射度, 高亮度虚火花电子束源的强流测量方法——自积分线圈测量法。给出该线圈的实用化设计及其标定方法。实验表明, 这种线圈在强流环境里特性很好, 虚火花电子束的束质量比冷阴极电子束好得多。

关键词 虚火花放电, 强流脉冲电子束, 自积分线圈

1 引 言

虚火花放电是一种低气压(帕型曲线极小值左支)高电压气体放电现象。放电室简单地由具有共同中心放电通道的空心阴极和平板阳极之间插入单片绝缘子构成单隙空心阴极虚火花放电室, 或者交替地插入绝缘子和中间电极构成多隙空心阴极虚火花放电室。已经证明, 这种虚火花电子枪是一种产生高束质, 即小束径、强流密度、低发射度、高亮度电子束的装置^[1,2]。较之冷阴极发射的电子束, 虚火花电子束的质量要好得多, 其归一化亮度可与光阴极产生的电子束相比拟。在文献[3]中, 我们报道了一台由相修正型脉冲线加速器驱动的高功率、强流密度、低发射度、高亮度虚火花电子束源成功的运转, 本文则介绍用于该电子枪的强流脉冲电子束的束流强度测量方法——自积分线圈(Rogowski)测量法^[4]。该线圈具有一系列优点: 工作可靠, 适意安装, 性能长期稳定, 纳秒级上升时间, 输出电压与驱动电流分布和频率无关, 特别适用于强流测量。

2 理论与设计

2.1 设计理论

描述线圈的电路方程为

$$d\phi/dt = LdI_c/dt + RI_c \quad (1)$$

其中, ϕ 是穿过线圈次级绕线的磁通量, I_c 是流过线圈次级绕线的感应电流, L 是线圈自感, $R = R_c + R_s$ 是测流电阻和线圈趋肤电阻之和。依据方程右边两项大小的比较, 有两种不同的设计方

* 国家自然科学基金资助项目。

收稿日期: 1995年3月16日; 收到修改稿日期: 1995年5月2日。

法。当 $LdI_c/dt \ll RI_c$ 时, 感应电流 I_c 与磁通量的变化率 $d\phi/dt$ 成正比, 据此绕制的线圈称为微分式线圈; 而当 $LdI_c/dt \gg RI_c$ 时, 感应电流 I_c 与磁通量 ϕ 成正比, 据此绕制的线圈称为自积分式线圈。较之微分式线圈, 自积分式线圈具有下列优点: (1) 输出电压与频率无关; (2) 线圈对电子碰撞或者光致电流不敏感; (3) 上升时间受单匝线圈渡越时间的限制; (4) 由于线圈输出电压正比于电流而不是它的导数, 所以来自线圈的信号对缆线衰减不灵敏。据此可知, 设计自积分线圈对强脉冲电流的测量有利。

2.2 实用化设计

自积分线圈的实用化设计首先应注意要有合理的面积比, 即线圈架的截面积 πa^2 与线圈的面积 πr^2 之比约为 $0.2/N$, N 为线圈的总匝数, 如图 1 所示。其

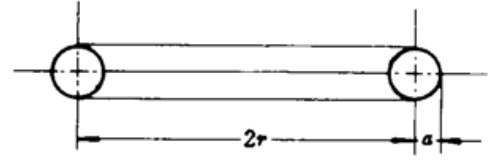


Fig. 1 Frame and size of a self-integrating coil

其次是线圈的衰减常数 L/R 应比单匝渡越时间 T 和驱动电流脉冲宽度大得多(我所拉曼自由电子激光器所用的冷阴极电子束脉冲宽度为 60 ns)。第三是线圈渡越时间约取驱动电流上升时间的 $1/4$ 或者 $1/5$ 。一般来说, 虚火花放电产生的束流脉冲的前沿约 $5 \sim 20$ ns。此外, 为保证由驱动电流在多匝绕线中激起的感应电流产生的磁通量尽可能多地通过绕线, 必须将所制线圈嵌入大小合适的金属屏蔽盒或者槽内, 以使该线圈变成一个螺线管。基于上述设计考虑, 根据下列公式, 求出自积分线圈的自感 L , 衰变常数 τ , 渡越时间 T , 磁通量 ϕ 和灵敏度 K , 以及绕线的集肤电阻 R_s [4]:

$$L = \mu_0 a N [\pi a / p + \ln(2p/d) - 5/4 - \sum_{i=0}^3 \alpha_i (\ln N)^i] \quad (2)$$

$$R_s = (2r/pd) [\pi f \rho \mu (p^2 + l^2)]^{1/2} \quad (3)$$

$$T = (N/c) [\epsilon_r (p^2 + l^2)]^{1/2} \quad (4)$$

$$\tau = L / (R_c + R_s) \quad (5)$$

$$\phi = \mu I N a^2 / 2r \quad (6)$$

$$K = R\phi / LI \quad (7)$$

式中, N 为绕线总匝数, p 为匝距, l 为单匝长度, d 为绕线直径, ρ 为绕线电阻率, ϵ_r 为相对介电常数, α_i 为列表函数。结合实际器件的要求, 给定 $r = 25$ mm, $a = 2$ mm, $\epsilon_r = 3.4$ (选尼龙作线圈骨架), $d = 1$ mm, $\rho = 1.6 \times 10^{-8} \Omega/m$, $f = 16.7$ MHz, $R_c = 0.2 \Omega$, 求得 $\tau \approx 400$ ns, $T \approx 2.65$ ns, $K \approx 8 \times 10^{-3}$ V/A。

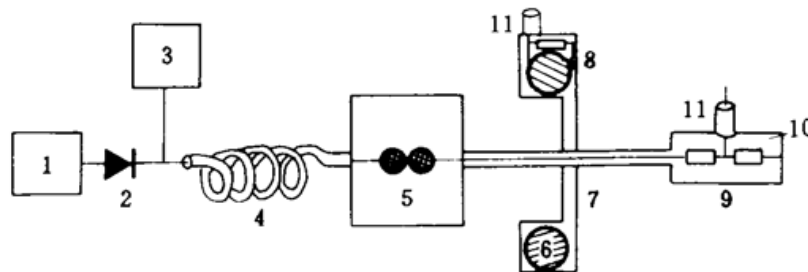


Fig. 2 Schematic of experimental calibration

- 1: YDJ-5/50 testing transformer; 2: 2DLJ(6) silicon pile; 3: high-voltage electrostatic meter; 4: 50 m/75 Ω cable; 5: sphere gap switch; 6: self-integrating coil; 7: shielding box; 8: induced current sampling resistor; 9: main current switching box; 10: main current sampling resistor; 11: BNC plugs

2.3 标定

自积分线圈的实验标定线路示意图如图 2 所示。一台试验变压器 YDJ-5/50 经一 2DLJ

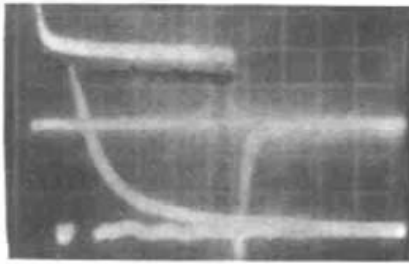


Fig. 3 Sampling voltage photo showing the driving and induced currents taken by a wide-band oscilloscope with C31 camera. Upper trace is the driving current, 2 V/div.; Lower trace, induced current, 50 mV/div.

(6) 硅堆对一根长约 50 m (75Ω) 的电缆充电, 当充电电压达到球隙开关的击穿阈值时, 临界击穿电压由高压静电计即时读出, 开关击穿, 放电电流, 即驱动电流, 沿被屏蔽盒屏蔽的自积分线圈的轴线流过。流过电阻 $75 \Omega + 0.18 \Omega$ 的驱动电流, 由 0.18Ω 取样电阻取出电压信号。感应电压信号则由测流电阻 R_s 取出。驱动电流和感应电流的电压信号同时由一台宽带示波器上的 C31 一次成像摄得, 所得的取样电压如图 3 所示。这样由实验数据可求得所设计的 Rogowski 线圈的灵敏度为 $K \approx 7.5 \times 10^{-3} \text{ V/A}$ 。与设计值相比, 7% 的相对误差是相当小的, 这说明设计理论与实验结果符合得很好。

3 虚火花电子束源实验

由修正型脉冲线加速器驱动的高功率、强流密度、低发射度、高亮度虚火花电子束源于 1994 年 11 月 22 日在上海光机所运转成功。

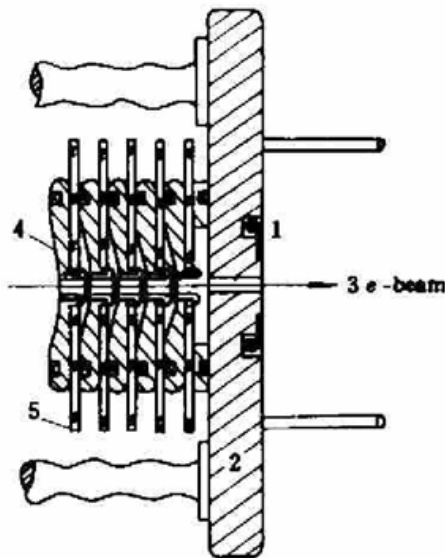


Fig. 4 Rogowski coil used to measure the beam current in the pseudospark electron gun
1; rogowski coil; 2; anode; 3; ejected electron beam;
4; intermediate electrode; 5; insulator disk

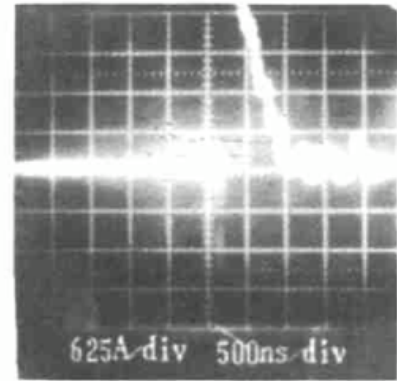


Fig. 5 Typical sampling waveform of the ejected electron beam current. Beam current 625 A/div.; pulse duration 500 ns/div.

标定了的自积分线圈用于总体实验的示意图如图 4 所示, 磁自箍缩的虚火花电子束, 在 200 kV, 约 $3 \mu\text{s}$ 的电压脉冲的驱动下, 在虚火花放电室中产生, 并从它的阳极孔射出, 背景气体是 15 Pa 氮气。该电子束的出射束流强度由上述设计的自积分线圈测出, 所测的束流波形如图 5 所示, 由图可见, 束流强度 2.2 kA, 束脉宽约 400 ns, 上升前沿估计小于 20 ns。电子束的束斑由酸敏纸和 0.05 mm 厚的铜箔测出, 在无引导场约束的情况下, 在阳极下游、漂移管轴线上 3 cm 处, 束斑 1 mm, 在 15 cm 处, 电子束在酸敏纸上留下一个 1.6 mm 的小孔。依据阳极下

游处所测数据,利用 Lawson 束自场力平衡箍缩公式求得,该处的归一化发射度为 $23 \pi \text{mm-mrad}$,归一化亮度约 $8 \times 10^{10} \text{ A}/(\text{m-rad})^2$ 。为与原拉曼自由电子激光器所用的冷阴极电子束束质^[5]相比较,列出它的有关参数:在 450 kV,60 ns 的高压脉冲驱动下,束流强度 1 kA,束斑 6 mm(引导场约束),归一化发射度 $230 \pi \text{mm-mrad}$ 。比较可知,虚火花电子束束质比冷阴极电子束要好得多;在仅不足一半小的电压下,束流强度高一倍多,脉宽增大 6 倍多,束斑缩小了 6 倍,归一化发射度降低一个数量级,这样高质量的电子束显然有利于未来拉曼自由电子激光器效率的提高和波长的缩短。虚火花电子束源的运转成功,为进一步开展虚火花电子枪气载自由电子激光器以及软 X 射线激光器的研究奠定了基础。

实验同时表明,使用自积分 Rogowski 线圈测量强流电子束,不失为一好方法。线圈大小依具体要求随意设计,在器件上易于安装,对驱动电流分布和频率不敏感,低于 20 ns 级的上升前沿,适用于强流测量。

参 考 文 献

- 1 J. Christiansen, Ch. Schultheiss. Production of high current particle beam by low pressure spark discharge. *Z. Phys.*, 1979, A290: 35
- 2 W. W. Destler, Z. Segalow, J. Rodgers *et al.*. Highpower, high brightness electron beam generation in a pulse-line driven pseudospark discharge. *Appl. Phys. Lett.*, 1993, 62(15): 1739
- 3 Junbiao Zhu, Mingchang Wang, Zhijiang Wang *et al.*. High power, intense current density pseudospark electron beam driven by a modified pulse line accelerator. *Chinese J. of Lasers*, (to be published)
- 4 D. G. Pellinen, N. S. DiCapua, S. E. Sampayan *et al.*. Rogoski coil for measuring fast, high level pulsed currents. *Rev. Sci. Instrum.*, 1980, 51(11): 1535
- 5 王明常,陆载通,张立芬等. 拉曼自由电子激光振荡器. *光学学报*, 1994, 14(3): 225

Measurement of an Intense Current Electron Beam Produced by Pseudospark Discharge

Zhu Junbiao Wang Mingchang Wang Zhijiang Zhang Lifeng

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

Abstract A self-integrating coil measurement of intense current in a successfully-operated pseudospark electron beam source characteristic of high power, intense current density, low emittance, and high brightness is introduced. The practical design and calibration ways are given. Experiments show that this coil behaves very well in the case of intense current; the quality of the pseudospark electron beam is much better than that of the cold cathode one.

Key words pseudospark discharge, intense current electron beam, self-integrating coil