

文章编号: 0258-7025(2001)02-0119-03

自由电子激光器虚火花电子束源的 阻抗匹配研究*

于金辉 王明常 周慧芬 陆 宾 冯诚士

(中国科学院上海光机所强光光学开放实验室 上海 201800)

提要 分析了自由电子激光器的小型虚火花电子束源在去掉脉冲传输线的情况下的阻抗匹配问题,并对此进行放电实验。得到了虚火花放电过程中的放电室阻抗曲线,并利用小型放电装置在 255 kV 的放电电压下得到了束流强度为 4.3 kA 的电子束输出。

关键词 自由电子激光器,虚火花放电室,阻抗匹配,脉冲传输线

中图分类号: TN 248.6 文献标识码: A

Study of Impedance Match of Pseudospark *e*-beam Source of Free Electron Laser

YU Jin-hui WANG Ming-chang ZHOU Hui-feng LU Bin FENG Cheng-shi

(Laboratory for High Intensity Optics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)

Abstract This paper reports an analysis of problem about impedance match of pseudospark *e*-beam source of free electron laser and the experiment results on compact device without pulse transmission line. The *e*-beam of 4.3 kA current under 255 kV discharge voltage is obtained and the impedance curve of pseudospark discharge chamber filled with nitrogen at 15 Pa is given.

Key words free electron laser, pseudospark discharge chamber, impedance match, pulse transmission line

1 引 言

自由电子激光器输出功率和效率的提高需要有品质优良的电子束。虚火花放电能产生高亮度、低发射度的强流电子束^[1,2],因此可以作为自由电子激光器的电子束源。通常使用的多隙虚火花放电室(PSC)是利用虚火花放电原理,在有共同放电通道的空心阴极与平板阳极之间交替插入中间电极和绝缘子构成的。多隙虚火花放电室工作在脉冲情况下,可以得到放电电压很高,束流强度很大的优质电子束。为了在放电室上获得足够大的回路电流和减小不必要的功率反射以提高整个放电回路的工作效率,在设计虚火花放电装置时,驱动电源与虚火花放电室的阻抗匹配是需要首先考虑的一个重要因素。

以前采用脉冲线加速器作为驱动电源,由 Marx 对脉冲传输线充电,脉冲传输线再对虚火花放电室放电。在这种情况下,脉冲传输线的存在使虚火花放电室对 Marx 的阻抗匹配要求变低,实验中也得到了较好的电子束输出^[3]。但是,原放电装置的驱动电源部分体积庞大,造成移动不便,不利于实用。为了实现整个放电装置的小型化和实用化,我们重新设计了小型的 Marx 发生器,并去掉脉冲传输线,使 Marx 发生器产生的高脉冲电压直接作用于虚火花放电室。由于去掉了脉冲传输线,设计时必须更严格地考虑虚火花放电室和 Marx 阻抗的匹配问题。

2 实验装置

在总体实验装置结构中,Marx 发生器采用六级电容双向充电,回路串联电容 $C_m = 16.7$ nF。直流电源、触发系统和 Marx 发生器放在大小为 $1.1 \text{ m} \times 0.7 \text{ m} \times 1.17 \text{ m}$ 的油箱中。整个虚火花放电室浸于

* 国家自然科学基金(69337010)资助项目。

收稿日期:1999-10-29;收到修改稿日期:1999-12-02

可耐高压的变压器油中。放电室阳极入口处通过压电陶瓷阀门与氮气瓶相连,还接有真空泵、真空规管和漂移管。放电室内的气压由真空自动控制仪通过真空规管来测量,并通过压电陶瓷进气阀门控制。放电电压经与放电室相连的水电阻分压器(连同放电室置于过渡段的变压器油中)一次分压,再经金属膜电阻二次分压后,输入到示波器。回路放电电流强度由金属薄膜做成的分流器取样后输入到示波器。从放电室阳极口射出的电子束束流强度由密封在阳极板上的 Rogowski 线圈测出。电子束焦斑由放在漂移管内的酸敏纸获得。

3 实验结果与分析

首先对设计后的 Marx 发生器进行短路实验,得到 Marx 回路电感 $L_m = 1.12 \mu\text{H}$, 则 $2\sqrt{L_m/C_m} = 16.4 \Omega$, 回路电阻 $R_s = 1.4 \Omega$ 。然后,用这种放电装置进行放电实验。其中,虚火花放电室充 15 Pa 的高纯氮气。控制台加充电电压 60 kV,对 Marx 发生器并联充电,触发后 Marx 发生器内六级电容器串联放电,产生峰值 255 kV,半高宽 64 ns 的高电压脉冲,直接作用于虚火花放电室,放电室中发生虚火花放电,发射出高亮度、低发射度的自磁箍缩电子束进入漂移管。图 1 是实验得到的典型的放电电压与电子束流强度的波形。图 2 是置于漂移管中距虚火花放电室阳极不同距离处经电子束轰击过的酸敏纸。图 3 则为实验得到的虚火花放电室阻抗曲线。

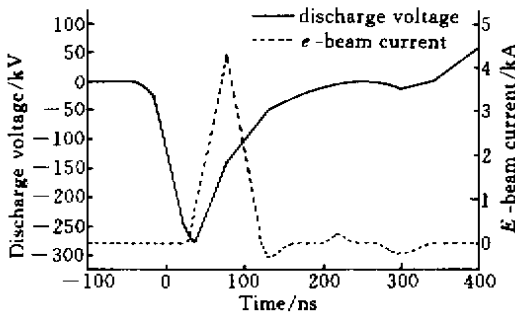


图 1 典型的放电电压和束流强度波形
Fig.1 Typical waveform of discharge voltage and e-beam current

从图 1 可以看出,Marx 发生器产生的高电压脉冲峰值为 255 kV,前沿为 80 ns。电子束流在电压脉冲近峰值处出现,并在 50 ns 的时间内快速达到最大值 4.3kA。与有脉冲传输线的装置比较,放电电压

脉冲的前沿变窄。在未去掉脉冲传输线的放电装置上,电压脉冲的前沿约为 300 ns^[3],而在本装置上一般只有约 80~100 ns。这种现象的产生即是虚火花放电室与 Marx 阻抗匹配的结果。实际上虚火花放电室是含有电容、电感和电阻特性的复杂的放电器件,其阻抗只能通过实验的方法得到。通过实验,我们得到了虚火花放电室的阻抗曲线。

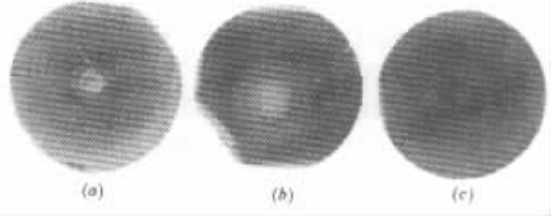


图 2 距放电室阳极板 8 cm、12 cm 及 16 cm 处被电子束轰击过的酸敏纸
Fig.2 Acid-sensitive film bombarded by electron beam at 8 cm, 12 cm and 16 cm from anode of PSC
(a) 8 cm;(b) 12 cm;(c) 16 cm

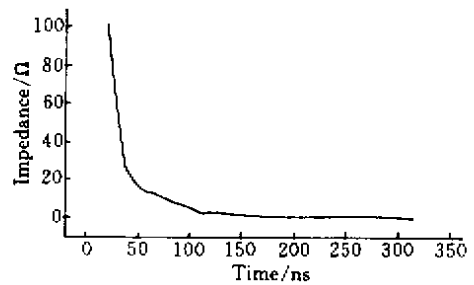


图 3 充有 15 Pa 氮气时虚火花放电室的特性阻抗曲线
Fig.3 Impedance curve of PSC filled with nitrogen at 15 Pa

图 3 所示即为虚火花放电室阻抗曲线。它是由虚火花放电电压除以回路放电电流得到的。目前,尽管虚火花放电的具体机制还没有一个公认的理论解释,但是,虚火花放电一般可分为三个阶段: Townsend 放电期、空心阴极期及超密辉光放电期。当 Marx 发生器电压脉冲建立而放电室内的气体尚未击穿时,在整个放电回路中,放电室近似于开路,阻抗很大。而后放电室内发生 Townsend 放电,有很微弱的电子出现,阻抗开始减小。接着由电场递增理论知^[4],多隙虚火花放电室开始发生逐级击穿,阻抗逐渐变小。经过空心阴极期后,在超密辉光放电期即电压脉冲达到一定值时,强电子束流开始出现,并在很短的时间内快速达到最大值。此时,对多隙虚火花放电室,在最后一级(靠近阳极板的一级)上发生了类似于真空二极管的击穿,表现为电压很小,

回路电流很大并呈阻尼振荡形式,虚火花放电室阻抗就变得很小。当放电结束,虚火花放电室又恢复为击穿前状态,但时间相对较长,不再考虑。

以上阻抗变化过程可以分为三个阶段,即 $R_s + Z_{ps}$ (Z_{ps} 为虚火花放电室阻抗) 大于、等于和小于 $2\sqrt{L_m/C_m}$, 它们对应于非振荡、临界非振荡及阻尼振荡三种情况。分别取 $Z_{ps} = 40 \Omega, 15 \Omega$ 及 9Ω 进行计算, 得电流波形曲线(见图 4)。可见, 随着负载阻抗

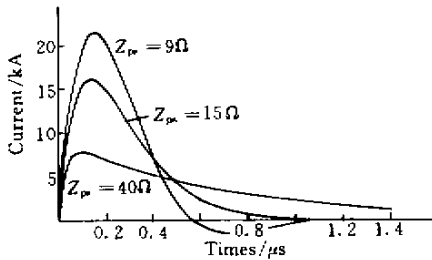


图 4 近似计算得到的击穿后三种情况下虚火花放电室放电电流曲线

Fig.4 Current curves under three conditions after breakdown by approximately calculation

的减小,回路电流峰值增大。临界非振荡是期望的最佳工作状态,此时虚火花负载上无功功率反射,回路无振荡能量损耗,Marx 输出对虚火花放电室放电效率最高,即达到了所要求的阻抗匹配。实际上,由于放电室阻抗在虚火花放电过程中的动态变化,整个放电过程的电流变化是上述各种情况的组合。阻抗匹配也只能是要求在虚火花放电室有电子束流输出时的阻抗在回路临界非振荡点附近即可。在图3所

示的放电实验中,电子束流约在 50 ns 处达到峰值,相应的阻抗值约为 16Ω ,刚好处于前面所述的临界非振荡状态点附近,即虚火花放电室工作点处的阻抗值与 Marx 发生器的阻抗是匹配的。另外,虚火花放电室的阻抗会因内充气压的变化而有些许变化,但总体变化趋势不变。

4 结 论

综上所述,我们考虑无脉冲传输线时 Marx 与虚火花放电室的阻抗匹配,设计了小型的虚火花放电装置作为自由电子激光器的电子束源。用此装置进行虚火花放电实验,首次得到了充有 15 Pa 高纯氮气的虚火花放电室的阻抗曲线和放电电压为 255 kV,束流强度为 4.3 kA 的电子束输出。

致谢 对中国原子能研究院曾乃工教授提供的帮助深表谢意。

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 Wang Mingchang, Zhu Junbiao, Wang Zhijiang *et al.*. Successful operation of pseudospark electron beam source. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1995, **15** (2) 255 (in Chinese)
- 3 Huang Yu, Wang Mingchang, Lu Bin *et al.*. A 300 kV pseudospark discharge experiment. *High Power Laser and Particle beams* (强激光与粒子束), 1998, **10** (4) 635 ~ 637 (in Chinese)
- 4 X. L. Jiang. Field escalation effect in the pulsed ion beam sources based on the pseudospark discharge. *Rev. Sci. Instrum.*, 1992, **63** (4) 2420 ~ 2421