

高电流低气压等离子体阴极电子枪设计与实验*

谢文楷, 黎晓云, 王彬, 蒙林, 鄢扬, 高昕艳

(电子科技大学 高能电子学研究所, 成都 610054)

摘要: 设计了一种新型的高功率低气压等离子体电子枪。基于空心阴极效应和低压辉光放电原理与经验,确定了空心阴极、加速间隙、工作气压范围等。提出关于等离子体阴极电子枪产生高功率、高密度电子束源的整体方案。分别在连续馈气和脉冲馈气条件下进行实验测试,得到放电电流、收集极电流与气压、脉宽及调制器电压的关系。实验获得电子枪的典型放电电流为150~200 A,脉宽60 μs ;传输电子束达到30~80 A,脉宽60 μs 。该结果表明该新型等离子体阴极电子枪可以取代材料阴极作为大电流、长脉冲电子束源,特别适用于等离子体加载微波管。

关键词: 高功率微波; 等离子体; 等离子体阴极电子枪; 辉光放电; 空心阴极

中图分类号: O462; O463; TN101; TN128 **文献标识码:** A

发展高功率微波技术的关键器件是高功率电子枪。常规的高功率电子枪使用典型的热阴极或场致发射阴极作为电子源。热阴极电子枪可提供长脉冲宽度甚至连续工作,但是通常具有有限电流密度(典型值为10~20 mA/cm^2)、高电子功率和有限的寿命。场致发射电子枪提供高电流密度,但是仅为短脉冲长度(典型值小于等于1 μs),因为等离子体闭合加速间隙。此外,这两种常规电子枪都因来自固有或由电子束产生的等离子体的离子轰击易严重退化。

近年来的研究表明,空心阴极等离子体电子枪能产生高电流长脉冲的电子注。文献[1]展示了一种在激光腔体中控制放电气体的电子枪,等离子体电子由高压辉光放电产生。文献[2-3]进一步给出了几类独特的高电流、低压等离子体阴极电子枪的特性和实验结果。

等离子体阴极电子枪(PCE-gun)使用惰性气体(典型的如氦气)低压空心阴极放电产生的等离子体作为电子源,以高导流、多孔径栅格结构来提取和加速电子以形成电子注。PCE-gun 低压电离脉冲控制在源区的等离子体密度以避免等离子体闭合加速间隙,并提供高电流密度(大于20 A/cm^2)和长脉冲(大于100 μs)。此外,多孔径栅格产生高导流系数电子注(大于10 μp),因为每一孔径的导流系数在形成最终的电子注中是简单相加的^[4,6]。

等离子体阴极电子枪可应用于激光器、大规模集成电路的电子束曝光以及多种高功率微波器件,尤其是已成功应用于等离子体辅助慢波振荡器^[7]。等离子体可辅助电子注通过微波相互作用区,并可改善电子注同电磁结构的耦合,以得到更高的器件效率,等离子体阴极则使回轰的高能离子对阴极的破坏降低到最小。等离子体阴极电子枪产生电子注的独特方法正好满足等离子体加载微波管的种种要求。为此,我们设计了高电流、低气压等离子体阴极电子枪,并进行了较细致的实验。

1 电子枪设计

1.1 空心阴极

等离子体阴极电子枪主要采用的是空心阴极,并利用空心阴极的放电特性来产生电子束。将阴极制成圆筒空腔,即所谓空心阴极,形成一种特殊形式的辉光放电,阴极区、负辉区都被包括在阴极空腔的内部,并使负辉区相互重叠,其放电电流密度比平板结构阴极的正常辉光放电显著增大,这种放电现象称为空心阴极效应。

在一定气压下,空心圆筒阴极的半径必须大于阴极暗区的厚度。有人在氦气、钨阴极的空心阴极放电中总结出

* 收稿日期:2005-01-08; 修订日期:2005-12-06

基金项目:国家自然科学基金资助课题(60401006);大功率微波电真空器件技术国家级重点实验室基金资助课题

作者简介:谢文楷(1945—),男,四川省中江县人,硕士,教授、博士生导师;从事等离子体加载微波器件理论及实验研究工作;

wkxie@uestc.edu.cn。

$$1.33 \text{ Pa} \cdot \text{cm} < pd < 13.3 \text{ Pa} \cdot \text{cm} \quad (1)$$

式中: d 为圆筒阴极直径; p 为所充气体压强。

空心阴极由金属构成,较可取的是非磁化金属,例如殷钢、钼、钽或铬。这些材料的二次电子发射率适合空心阴极辉光放电。阴极的高二次电子发射率放电可通过光氧化物或化学性质活泼的金属,例如铝、铍和铝镁合金蒙皮阴极表面来取得。并用微量的氧气,典型的大约 $2.66 \times 10^{-2} \text{ Pa}$ 掺杂填充气体,以便在空心阴极内表面形成金属氧化物薄层。它可以降低功函数,并增大二次电子发射率。较高的发射率可以显著增加离化率,允许在较低气压下产生高密度等离子体。

空心阴极要求填充在需要的压强下能离化的气体,可使用氢和氖,但氦被优先选择,因为它有承受高电压的能力。

维持活性丝插入空心阴极,负偏压大约为 1 kV ,以维持脉冲间低电流(大约 10 mA)连续放电,以至高电流放电脉冲可以被小的起伏触发。

电离阳极栅具有高的光学透明度(大约 80%),但又具有较小的孔径,以避免等离子体穿过栅的通道。一方面,通过该栅从等离子体中提取电子注;另一方面,借助于电离脉冲器控制等离子体的密度以及约束栅和空腔内的等离子体,产生持续时间长放电脉冲,并避免在高电压下短路放电。

典型空心阴极设计参数如下:阴极材料为不锈钢,阴极空腔尺寸为 $\phi 79 \text{ mm} \times 90 \text{ mm} + \phi 68 \text{ mm} \times 42 \text{ mm}$;电离阳极材料为钼,尺寸为 $\phi 64 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$,163孔($\phi 3.0 \text{ mm}$)六角形阵列均匀排布;维持活性丝为钨丝, $\phi 3 \text{ mm} \times 36.4 \text{ mm}$;维持活性电压为 $1 \sim 2 \text{ kV}$;电离脉冲器电压小于 5 kV ;工作气体为氦气,压强 $0.13 \sim 0.66 \text{ Pa}$ 。

在本设计中,气体压力保持在一个恰当的水平上,既要避免电子枪中电压击穿,又要能得到足够的离子来中和电子束的空间电荷电位下沉。

1.2 阴-阳极间隙

电离阳极的作用如同高导流系数多孔径电子加速间隙的第一个“栅”或“阴极”;加速间隙的第二个栅,即束阳极或加速阳极,具有同第一个栅精密符合的孔径。电子注通过第一栅从等离子体中提取,并进入加速间隙。在加速阳极和电离阳极之间加直流高压电场,加速达到间隙的电子并在加速间隙后形成高电流电子注。

加速电场为场致发射及随后的高压击穿(大约 100 kV/cm)所限制,该电场也为 Paschen 击穿所限制。一般地,如果气体压强和间隙间距乘积(即 pd 值)不超过典型值 $40 \text{ Pa} \cdot \text{cm}$,则 Paschen 击穿可以避免。换句话说,我们使用的是 Paschen 曲线最小值的左支。

在非常高的电压下,可通过使用多级加速结构以避免 Paschen 击穿,其中总的阳极电压被以小间隙分隔开的若干阳极结构分压而梯度变化。

在本设计中,高导流系数(定义为 $I/V^{3/2}$, I 是注空间电荷极限电流, V 是阳极电压)是通过应用多孔径来实现的。电离阳极上的圆孔径的六角形阵列与加速阳极上的一个类似阵列精密对中,以至总的导流系数等于每个孔径的导流系数乘上孔径数。借助电子轨道跟踪计算机编码,考虑空间电荷场,电子光学可以进行计算和设计。阴极孔径出口、电离阳极和加速阳极的适当配置,得到电子注的对称几何聚焦,它们汇聚成单个圆截面电子注进入漂移管或微波管中。加速间隙之间的间距由避免真空击穿允许的最大电场、希望的工作电压以及间隙中的电流密度来确定。设 E 是设计的电场强度(大约为 100 kV/cm),而电流密度由一阶 Child-Langmuir 方程来确定,则来自电子枪的电流密度为

$$J_e = PTV^{3/2}/b^2 = PTEV^{1/2}/b \quad (2)$$

式中: J_e 为孔径上的电子电流密度; P 为电子导流系数($2.33 \times 10^{-6} \text{ perv}$); T 是多孔径栅阵列的有效通过率; V 是间隙两端的电压; b 是间隙间距。

随着束电压增加,高压位进一步推进到等离子体中,收集放电电流的更大部分。这时,高压功率电源通过增加有效阳极位与放电相互作用,它增加放电电流和等离子体密度,但引起等离子体前端变为不稳定,也导致加速栅阻断和击穿。为避免出现这些问题,并增加 PCE-gun 可用的电流和电压,我们采用一个非常精良的光栅连接于电离阳极的背面。一方面该栅形成的部分透明电极定义了一个等离子体面,它决定和稳定加速平面的位置以使电子从同一位置(即光栅平面)进入加速区,独立于系统的电压和电流。这意味着设计的电子光学得以稳定。电子光学的变化增加加速栅对电子的截获,它可能导致击穿。另一方面,该栅提供等离子体放电过程和电子束提取过程之间的隔离。由此措施,可以稳定地实现电子从等离子体中的提取,使电子枪用任意的电压

和电流组合作。

典型加速间隙设计参数如下: 电离阳极为钼, 尺寸为 $\phi 80 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$; 阳极孔径为 $\phi 3.4 \text{ mm}$, 163 孔, 六角形阵列均匀排布; 加速阳极与电离阳极相同; 加速间隙间距为 1[#]($\phi 3.40 \text{ mm}$) 电子枪 16.40 mm 可调, 2[#]($\phi 3.40 \text{ mm}$) 电子枪 15.64 mm(可调); 加速电压为 40 ~ 100 kV; 光栅为不锈钢, 尺寸为 $\phi 80 \text{ mm} \times 0.15 \text{ mm}$, 栅孔为 $\phi 0.5 \text{ mm}$, 8 587 个孔(边长为 32 mm 的正六边形内均匀配置)。

1.3 总体设计

空心阴极等离子体电子枪作为新型高电流、低压电子束源, 其总体结构装配如图 1 所示, 其总体电气实验如图 2 所示。

直流高压电源通过一组电阻(20 k Ω)在电离阳极与加速阳极之间形成一个高压(加速阳极为正), 使电子加速通过加速间隙。并联支路上的一个开关和负载电阻(10 k Ω)可以清零束直流电源。另一并联支路上的分压电阻(10 Ω)和电容(2.5 μF)是束电源的能量储蓄器。一个撬棒电路与分压电阻(10 Ω)相连接, 以降低由于故

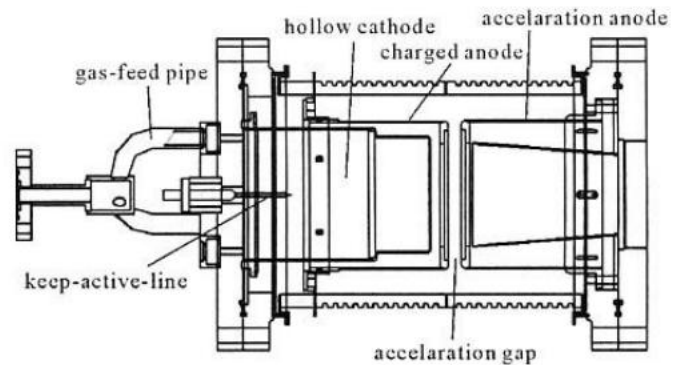


Fig. 1 Plasma-cathode e-gun

图 1 等离子体阴极电子枪结构图

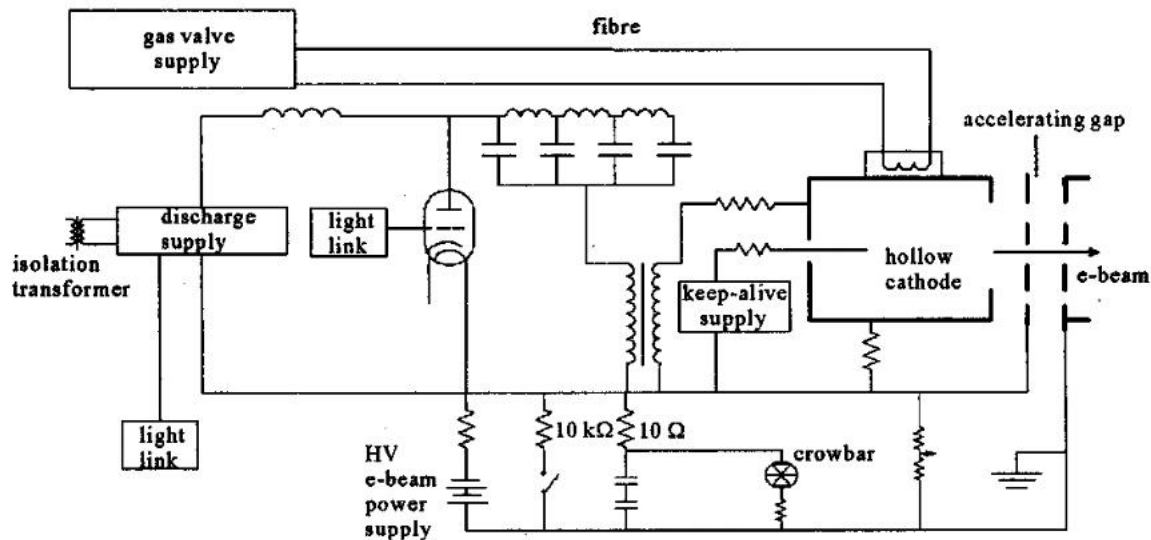


Fig. 2 Schematic circuit diagram of the experiment of the plasma-cathode e-gun

图 2 等离子体阴极电子枪总体实验示意图

障引起的高电压通过电容存储器的电压。撬棒能在输出末端的能量超过预置的电压限制时通过低阻分流使其能量迅速降低^[8]。

电离脉冲器加在空心阴极和电离阳极之间, 放电脉冲使气体电离形成等离子体, 空心阴极的等离子体密度、束电流密度、束电流的脉冲波形、脉冲宽度和脉冲重复率单独受电离脉冲器控制。电子枪产生的高电流电子束通过等离子体填充波导漂移段进入互作用慢波结构, 不需要外加轴向聚焦磁场。

电子枪的馈气阀门与空心阴极相连接, 馈气阀门的电源悬浮在 50 ~ 150 kV 的负高压上, 我们利用光纤对馈气阀门隔离控制以达到控制电子枪内气压的目的。整个馈气系统有连续和脉冲两种工作方式, 其中脉冲工作方式可以实现电子枪区域与互作用区域所需的气压差; 连续馈气则要求更低的工作压强。

2 实验测试

2.1 测试方法

等离子体阴极电子枪连接于由机械泵所组成的抽真空系统上。等离子体阴极电子枪的照片如图 3 所示。测试调制器的输出电压波形, 脉冲前沿为 6.6 μs , 下降沿为 15 μs , 平坦部分为 60 μs , 平坦部分波动小于 5%。

测试维持活性电源的电流, 在维持活性电压为 2 kV、空腔阴极氦气压强约为 1 Pa 的情况下, 测得的维持活性电流约为 10 A, 且相当稳定。该结果证明在维持活性丝与空心阴极腔体间存在一个小电流的稳定放电。

系统真空度和馈气气压的测试用安装于排管部件上的真空规进行。典型的电子枪系统真空度为 $(5 \sim 8) \times 10^{-5}$ Pa, 经 150 °C 烘烤后, 可达 1.3×10^{-5} Pa。压电阀连续工作将漂移区背景中性气体(氩气)压强控制在 10^{-3} Pa 左右。空心阴极工作气体氦气可用压电阀连续馈气, 也可采用压电阀(或电磁阀)脉冲馈气。控制气体压力范围为 $10^{-1} \sim 10$ Pa, 控制精度可达到 0.01 Pa。

空心阴极放电电流用调制器回路中串联环形排布并联小电阻(0.2 Ω)取样测试, 环形排布并联小电阻作为取样电阻是尽可能减小杂散电感对测试准确度的影响。在电子枪出口漂移区末端, 用法拉第圆筒收集传输的电子束, 经取样电阻(0.2 Ω)接地, 用数字存储示波器测量取样电阻两端的压降, 即可得出电流波形和大小。

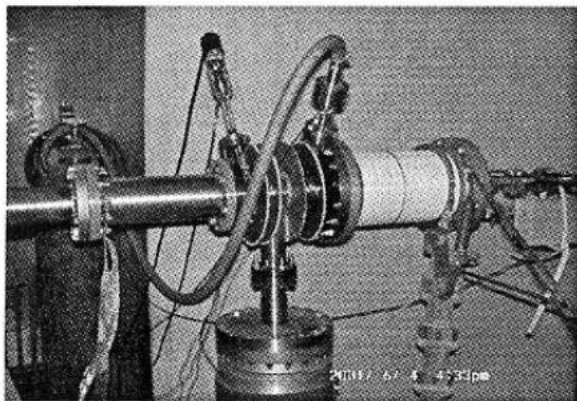


Fig. 3 Photo of the plasma cathode e-gun

图 3 等离子体阴极电子枪照片

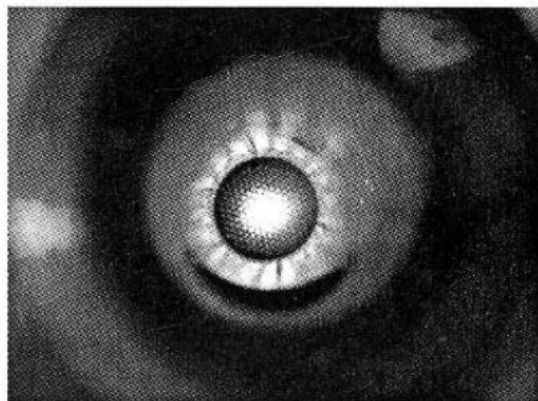


Fig. 4 Low pressure glow discharge

图 4 低压辉光放电亮斑

2.2 连续馈气条件下的实验测试

在系统连续馈气情形下, 通过光纤通信, 电压控制压电阀, 使阴极腔体真空度稳定于工作要求的气压, 然后加维持活性及调制器电压, 调制器可以单次或重复脉冲方式, 进行空腔阴极放电实验。通过电子枪排管部件出口处的玻璃窗, 观察到维持活性预放电点及辉光放电亮斑, 其照片如图 4。由此可以判断为辉光放电。

压电阀连续馈气典型放电测试结果如表 1。

表 1 压电阀连续馈气典型放电测试结果

Table 1 Typical result of continuous filled-in gases discharge (piezoelectric valve)

keep-alive voltage/kV	modulator voltage/kV	helium pressure/Pa	discharging current/A
3	4.5	1.8	200

典型放电电流波形如图 5 所示。连续馈气电子枪放电电流与调制器电压的关系如图 6 所示。

压电阀连续馈气典型电子束测试结果见表 2。收集极放电波形如图 7 所示。

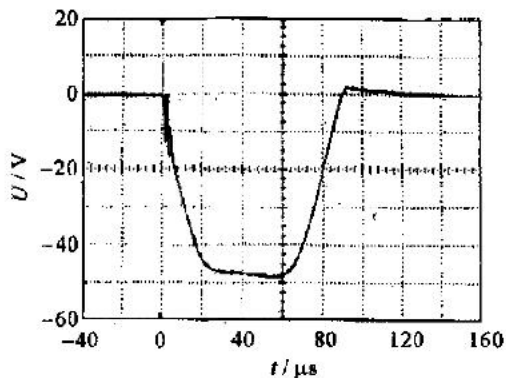


Fig. 5 Waveform of typical discharging current

图 5 典型放电电流波形

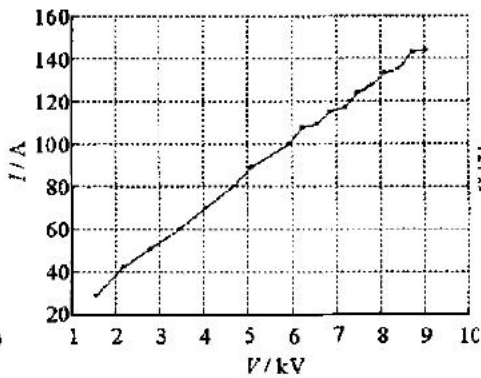


Fig. 6 Current of discharge vs voltage of modulator

图 6 放电电流与调制器电压关系

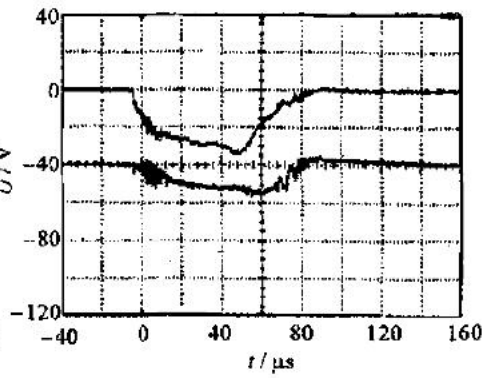


Fig. 7 Waveform of collector's current

图 7 收集极电流波形

表 2 压电阀连续馈气典型电子束测试结果

Table 2 Typical result of continuous filled-in gases e-beam (piezoelectric valve)

keep-alive voltage/kV	modulator voltage/kV	argon pressure/Pa	helium pressure/Pa	accelerating voltage/kV	collector current/A
3	4	4×10^{-4}	0.7	40	80
3	4	4×10^{-4}	0.7	40	80
3	4	4×10^{-4}	0.6	40	80

2.3 脉冲馈气条件下的实验测试

利用自行研制的光控脉冲馈气系统^[9]来产生任意宽度的脉冲(准确度 0.1 ms),对悬浮在负高压上的脉冲阀(压电阀或电磁阀)供电,以控制馈气压强。同时,以任意的时间延迟(精确度 0.05 ms)产生触发信号并提供给调制器,触发氢闸流管工作,从而输出脉冲调制信号给等离子体阴极电子枪,启动低压辉光放电。

表 3 为压电阀脉冲馈气电子枪典型放电测试结果。脉冲馈气典型电子枪放电电流波形如图 8 所示。脉冲馈气电子枪放电电流与调制器电压的关系如图 9 所示。

表 4 为压电阀脉冲馈气典型电子束测试结果。收集极波形如图 10 所示。

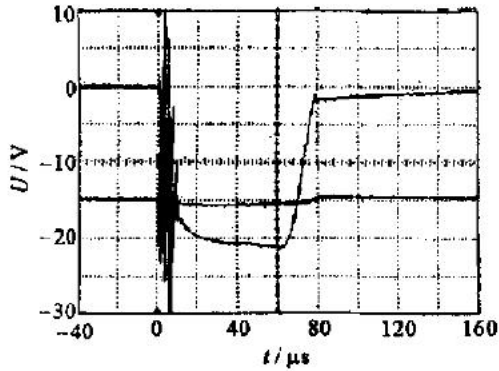


Fig. 8 Waveform of discharging current

图 8 放电电流波形

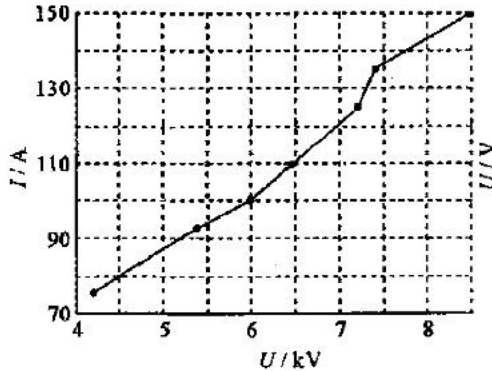


Fig. 9 Current of discharge vs

voltage of modulator

图 9 放电电流与调制器电压关系

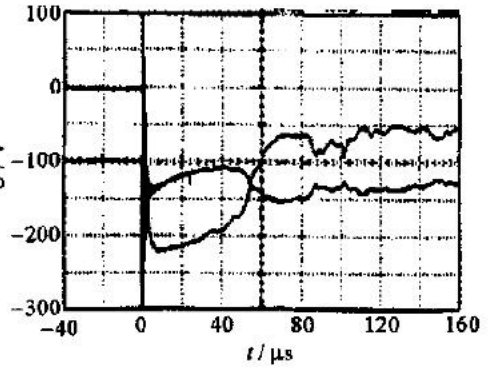


Fig. 10 Waveform of collector's current

图 10 收集极电流波形

表 3 压电阀脉冲馈气电子枪典型放电测试结果

Table 3 Typical result of gases-puff discharge (piezoelectric valve)

delay /ms	gases-puff pulse width/ms	voltage of piezo-electric valve/V	keep-alive voltage/kV	modulator voltage/kV	gases pressure/Pa	current of tube/A
30	29	129	2	3.0	0.40	120
25	24	129	2	4.6	0.44	140
15	14	129	2	4.6	0.28	167
20	19	129	2	4.6	0.36	154

表 4 压电阀脉冲馈气典型电子束测试结果

Table 4 Typical result of gases-puff e-beam (piezoelectric valve)

delay /ms	gases-puff pulse width/ms	voltage of piezo-electric valve/V	keep-alive voltage/kV	modulator voltage/kV	gases pressure/Pa	collector current /A
10	9	82	3	4	40	80
10	9	82	3	4	40	80
10	delayed trigger	78	3	4	40	80

3 结 论

我们经过技术攻关,设计出一种新型的等离子体阴极电子枪。分别在连续馈气和脉冲馈气条件下进行电子枪放电实验和高压出束实验。在电极材料、空腔形状与容积、加速间隙、气体馈送压强、脉冲调制器电压等方面作了较深入细致的实验研究。电子枪典型放电电流已达到 150 ~ 200 A,脉宽 60 μs,传输电子束达到 30 ~ 80 A,脉宽 60 μs。

研究表明,等离子体阴极可以取代材料阴极,作为一类新型的大电流、长脉宽电子束源,在某些 HPM 源中有应用潜力。

参考文献:

[1] Kenchli R C I. Hollow cathode gas discharge device: U S Patent, 3831052[P]. [2005-01-08].
 [2] Gebel D M, Schumacher R W, Watkins R M. Long pulse plasma cathode e-gun[C]//Proc 9th Int Conf on High-Power Particle Beams. Washington D C, 1992:1093-1098.
 [3] Xie W K, Li X G, Meng L, et al. Experimental study of the plasma cathode electron gun[J]. *Int J of Infrared and Millimeter Waves*, 2002, 23(8):

1149-1158.

- [4] 谢文楷. 等离子体阴极电子枪及其特性[J]. 电子科技大学学报, 1996, **25**(s1):17-23. (Xie W K. Plasma cathode electron gun and it's characteristic. *Journal of University of Electronic Science and Technology of China*, 1996, **25**(s1):17-23)
- [5] Gobel D M, Butler J M, Schumacher R W, et al. High current, low-pressure plasma-cathode electron gun: U S patent, 5537005[P]. [2005-01-08].
- [6] 谢文楷, 黎晓云, 蒙林, 等. 等离子体阴极电子枪的实验研究[J]. 电子学报, 2003, **31**(3):338-340. (Xie W K, Li X Y, Meng L, et al. Experimental study of the plasma cathode electron gun. *Acta Electronica Sinica*, 2003, **31**(3):338-340)
- [7] Gobel D M, Schumacher R W. High-power microwave source based on an unmagnetized backward-wave oscillator[J]. *IEEE Trans on Plasma Science*, 1994, **22**(5):547-553.
- [8] 蒙林, 黎晓云, 谢文楷, 等. 充等离子体微波源高压电源的撬棒保护[J]. 强激光与粒子束, 2001, **13**(3):338-340. (Meng L, Li X Y, Xie W K, et al. Crowbar circuit protection of high voltage power supply of plasma filled HPM source. *High Power Laser and Particle Beams*, 2001, **13**(3):338-340)
- [9] 王彬, 谢文楷, 黎晓云, 等. PASOTRON 光控脉冲馈气系统及实验研究[J]. 电子科技大学学报, 2004, **33**(1):50-52. (Wang B, Xie W K, Li X Y, et al. Fibre-optic controlled gases-puff system for PASOTRON and it's application. *Journal of University of Electronic Science and Technology of China*, 2004, **33**(1):50-52)

Design and experiment of high-current low-pressure plasma-cathode e-gun

XIE Wen-kai, LI Xiao-yun, WANG Bin, MENG Lin, YAN Yang, GAO Xin-yan

(Institute of High Energy Electronics, University of Electronics Science and Technology of China, Chengdu 610054, China)

Abstract: The preliminary design of a new high-power low-pressure plasma-cathode e-gun is presented. Based on the hollow cathode effect and low-pressure glow discharge empirical formulas, the hollow cathode, the accelerating gap, and the working gas pressure region are given. The general experimental device of the low-pressure plasma cathode electron-gun generating high current density e-beam source is shown. Experiments has been done in continuous filled-in gases and gases-puff condition, and the discharging current of 150 ~ 200 A, the width of 60 μs and the collector current of 30 ~ 80 A, the width of 60 μs are obtained. The results show that the new plasma cathode e-gun can take the place of material cathode e-gun, especially in plasma filled microwave tubes.

Key words: High power microwave; Plasma; Plasma-cathode e-gun; Glow discharge; Hollow cathode

※ ※ ※ ※ ※

新港公司研制出 40 W 光纤耦合二极管激光束

美国光谱物理 (Spectra-Physics) 一分公司——新港公司(Newport Corporation)日前宣布推出一个新的钨钴钛系硬质合金 (ProLite) 系列 40 W 光纤耦合二极管激光束, 波长在 808 nm 和 940 nm, 实现从 800 μm 光纤中输出 40 W 的连续功率。

“该产品采用了防水封装, 装有散热器。这些新的高功率光纤耦合光束是固态泵浦在工业、航空、防卫、医学和高性能与高可靠性产品市场研究等领域应用的首选”。Spectra-Physics 公司半导体二极管激光器产品经理 Rajiv Pandey 说, “我们公司拥有光束制造、透镜和光纤阵列等技术专利, 确保我们的客户在使用这些产品能得到高能量转换效率和高亮度, 这也就减少了热负荷, 提高产品性能和产品寿命”。

日前 Spectra-Physics 公司已经扩大 ProLite 系列二极管激光解决方案范围, 产品波长范围扩大为 780~980 nm。单发射和光纤耦合单发射激光器可输出几 W 的功率, 多发射激光光束和光纤耦合光束可输出 10 W 甚至更高的功率。(汪道友 编译)