

用 WIP 电子枪的小型高重复频率 电子束加速器*

李锦兴 张 奇 唐鸿芳 王德安 夏能樵 郑宝鸿

(中国科学院电子学研究所 北京 100080)

摘 要 本文叙述了所研制的一台小型高重复频率电子束加速器装置。该装置的设计指标为: 输出电子束能量: 120—150keV; 电子束流强: 5—50A; 脉宽: 1 μ s; 重复频率: 100Hz; 电子束截面积: 5 $\times$ 50cm²。本加速器的主体是具有独特优点的 WIP 电子枪。本文着重分析了这种电子枪的工作原理和物理过程, 并给出初步实验结果。

关键词 电子束加速器, WIP 电子枪, 氦离子源

1 引言

为了开发高功率粒子束技术的实际应用, 近年来我们研制了一台多用途的小型电子束加速器。本加速器的主体部分为一种新型的 WIP (Wire-Ion-Plasma) 电子枪。由于这种电子枪的工作原理和结构特点, 不同于传统的热阴极电子枪和等离子体场发射冷阴极电子枪, 使其具有许多独特的优点^[1]。其主要优点是: 结构坚固、紧凑, 工作稳定、可靠, 寿命长, 电子束单能性好, 易于按比例放大, 可按不同用途设计成大截面矩形单向、双向和三维的, 以及径向收敛和发散型的各种电子束设备^[2]。因而, 可用于研制高重复频率脉冲或连续的大功率气体激光器和多种类型的电子束辐照加工机, 很适合于国防和工业上的实用化要求。

可是, 有关 WIP 电子枪的研制工作, 目前国外仅有一些原理性的实验装置的报道^[3-5]。我们研制这台装置, 试图通过一系列的实验研究, 来验证这种小型电子加速器的性能, 并探讨其应用前景, 为研制实用化的这种小型电子加速器打下基础。

2 WIP 电子枪的工作原理

WIP 电子枪是一种新型的以细丝放电产生的等离子体作为离子源的次级发射型冷阴极电子枪。图 1 为这种电子枪的工作原理示意图。它主要由四部分组成: 氦离子源(4)、离子提取栅(3)、加速区(2)和高压冷阴极(1)。其主要工作过程和工作原理如下: 整个电子枪抽真空后充入低气压氦, 氦离子源的细丝阳极接通电源后, 产生辉光放电, 氦被电离后产生等离子体。细丝周围的电场对于电子来说是一向心力场, 故可高效地静电捕获电

1993-04-23 收到, 1993-12-14 定稿

* 国家自然科学基金资助项目

李锦兴 男, 1938 年生, 高级工程师, 现从事脉冲功率技术和激光物理方面的研究。

张 奇 男, 1937 年生, 研究员, 现从事脉冲功率技术和激光物理方面的研究。

唐鸿芳 女, 1939 年生, 高级工程师, 现从事无线电技术方面的研究。

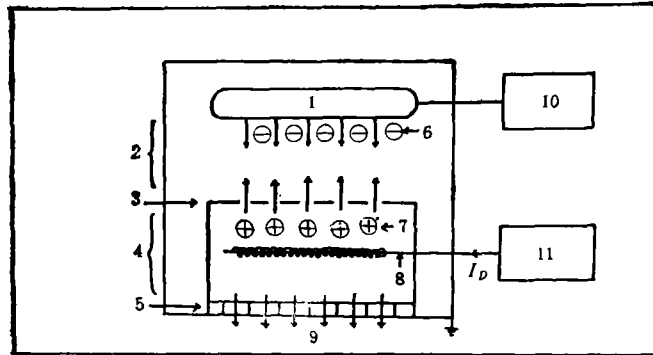


图1 WIP 电子枪工作原理示意图

1. 高压冷阴极 2. 加速区 3. 离子提取栅 4. 等离子体放电区(离子源) 5. 电子束窗口及其支撑结构 6. 次级发射电子 7. 离子 8. 放电丝 9. 输出电子束 10. 高压直流电源 11. 调制器

子并使电子绕细丝以螺旋轨道行进,大大增加了气体的电离几率,因而可有效地维持放电,形成所需的等离子体浓度^[6]。等离子体中的氦离子,有一部分在高压场的作用下通过栅极进入加速区,被加速到达高压阴极,高能氦离子撞击阴极表面后产生次级电子,次级电子又被反向加速通过栅极和等离子体放电区,然后穿过薄箔窗口射出,以供各种应用。

3 计算 WIP 电子枪输出束流特性的理论公式

进一步分析电子枪工作的如下物理过程,可以得出计算这种电子枪输出电子束流特性的近似理论公式。

(1) 设氦离子源的放电电流为 I_d , 因放电区内为等离子体,即电子、离子流各为 $0.5I_d$ 。其中电子被细丝周围的正电场所捕获,并围绕细丝作螺旋运动,而离子则趋向放电区处于地电位的腔壁。

(2) 假定趋向放电区腔壁的离子流是均匀的,则只有 $0.5I_d(S_g/S_d)$ 的离子流到达栅极。其中 S_g 为栅极面积, S_d 为放电区腔壁的表面积。

(3) 由于加速区负高压电场通过栅极透射入放电区,增加了朝向栅极的离子流,假定增加的离子流量为 I_{g+} 。又由于栅极本身只有一定的透过率,因而到达栅极的离子流将有一部分被栅极所截取,假定被截取的离子流为 I_{gi} 。设计电子枪时适当选择栅极的场增强因子和栅网的透过率,可使 $I_{g+} \approx I_{gi}$, 故通过栅极的离子流仍约为 $0.5I_d(S_g/S_d)$ 。

(4) 通过栅极进入加速区的离子流被加速到达阴极。假定,在阴极上每个入射的高能离子产生 γ_i 个次级电子,即 γ_i 为次级发射系数。

(5) 次级电子被加速朝向栅极,通过栅极和等离子体区,然后穿透薄箔窗口射出电子枪。假定栅极的透过率为 η_g , 窗箔及其支撑结构的透过率为 η_w 。

由此,我们可以得出, WIP 电子枪输出的电子束流 I_e 的近似计算公式如下:

$$I_e(t) \approx 0.5(S_g/S_d) \times \gamma_i \eta_g \eta_w I_d(t). \quad (1)$$

对于一定结构的电子枪来说, S_g/S_d , η_g , η_w 均为常数, 由于 WIP 电子枪的工作气压一般为 $<2.7 \text{ Pa}$ 。故可忽略电子枪内电子与氦原子、氦离子之间的相互作用 (100 keV 的电子, 在 2.7 Pa 的氦中的平均自由程为 100 m)。 γ_i 也可近似为常数。因而 (1) 式中的

$I_c(z)$ 与 $I_d(z)$ 之间的关系是线性的。由(1)式可知,在一定的条件下,WIP 电子枪的输出电子束电流的大小、脉宽和重复频率均可通过调节氦离子源的放电电流的大小、脉宽和重复频率来得到。由于 WIP 电子枪是一种次级发射型电子枪,故其所能得到的最大电子束电流密度,取决于加在加速区间隙的电压和一定电极结构条件下对氦离子流的空间电荷效应的限制。若采用平板电极结构,根据 Child-Langmuir 公式可知,在加速区可获得的最大氦离子流电流密度为

$$J_{ip} = 2.93 \times 10^{-8} V^{3/2} / d^2 \text{ (A/cm}^2\text{)}, \quad (2)$$

式中 V 为加速区间隙电压(单位为 V), d 为间隙间距(单位为 cm)。本电子枪选定 $V = 150\text{ kV}$, $d = 4\text{ cm}$, 则 $J_{ip} = 0.106\text{ A/cm}^2$ 。而 150 keV 高能氦离子打在不锈钢电极上时,其 $\gamma_e = 14$,所以采用平板电极可得到的最大电子束电流密度为 1.48 A/cm^2 。

若加速区采用同轴型电极结构,则根据 Langmuir-Compton 公式可知,整个同轴圆柱加速区所能提取的每单位长度的最大氦离子流电流为

$$I_{ic} = 1.716 \times 10^{-7} V^{3/2} / (\beta^2) \text{ (A/cm)}, \quad (3)$$

式中 β 为无量纲变量,由另一变量 γ 所决定, $\gamma = \ln(r/r_0)$, r 为高压冷阴极的曲率半径;我们设计时同样选取加速区同轴电极的间隙为 4 cm ,即 $r_0 = 14\text{ cm}$, $r = 18\text{ cm}$ 。根据参考文献[4]可算出 $\gamma = 0.251$, $\beta = 0.221$ 。所以 $I_{ic} = 11.3\text{ A/cm}$ 。

由于本 WIP 电子枪设计的有效区域仅占同轴圆柱的 25° 角区,所以高压加速区内每单位长度的最大氦离子流电流为 0.785 A/cm 。因而每单位长度所能获得的最大次级发射电子流为 10.99 A/cm 。电子束窗口宽度为 5 cm 。故采用同轴型电极结构时,所能获得的最大电子束电流密度为 2.198 A/cm^2 。

由此可见,在相同的条件下,在同一 WIP 电子枪中,采用同轴型电极结构将比采用平板型电极获得更大的电子束电流密度。本加速器设计了上述两种电极结构,以便实验中进行验证比较。

4 实验装置

小型高重复频率电子束加速器的主体部分是由氦离子源、离子提取栅和高压加速区组成的 WIP 电子枪。其主要辅助设备包括一台 150 kV 负高压直流电源及其储能滤波装置、离子源脉冲电源、真空机组和控制台等。

图 2 为 WIP 电子枪同轴型电极的结构剖面图。整个电子枪的外壳及其连接法兰均用无磁不锈钢加工而成。高压冷阴极也采用不锈钢加工,共设计两种形式,可以互相代换。一种为平面型;另一种为曲面型,其曲率半径为 18 cm ,边缘为均压环结构。高压电极通过高压馈线及其绝缘套管构成的高压电缆插座与枪体连结,并通过高压电缆与高压直流电源及其储能滤波电路相接。

等离子体放电室的尺寸为 7 cm (宽) $\times 4\text{ cm}$ (高) $\times 50\text{ cm}$ (长)。阳极采用 2—6 根直径为 0.24 mm 的铼钨丝,沿放电室中心平面等距纵向排列。

离子提取栅极用 1 mm 厚的不锈钢片加工焊接而成。也设计了两种形式:平面型和曲面型。曲面型栅极向着高压区一面的曲率半径为 14 cm 。栅极的透过率为 80% 。

电子束窗口用 $25\text{ }\mu\text{m}$ 厚的铝箔或钛箔,其支撑结构为边缘水冷的不锈钢栅,透过率为 90% 。

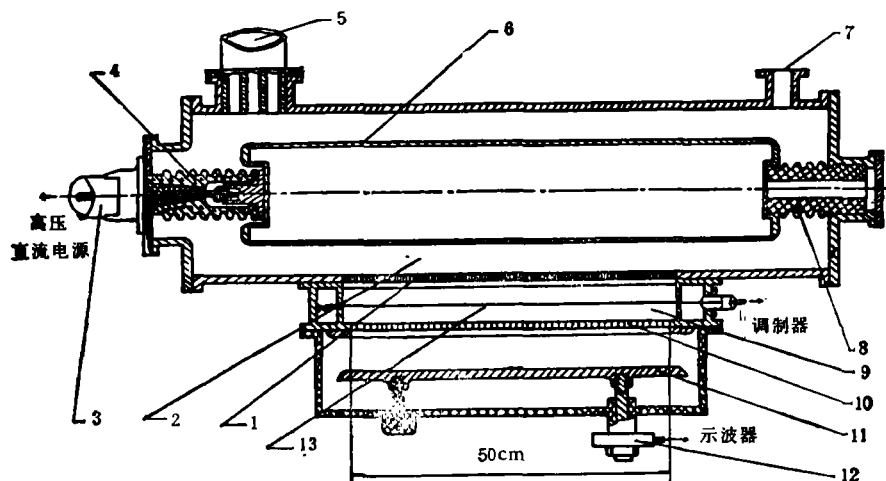


图2 WIP 电子枪结构设计图

1. 提取栅 2. 加速区 3. 高压同轴电缆 4. 高压馈线 5. 真空泵口 6. 高压冷阴极 7. 氦注入入口
8. 绝缘子 9. 等离子体放电区 10. 电子束窗口 11. 收集极 12. Pearson 电流变压器 13. 阳极丝

高压电源的最高输出电压为负 150kV, 工作电流为 100mA。它与储能滤波电路一起封装在一个油箱内。

本加速器的控制测试系统包括: 高压直流电源的控制和电压、电流的监视; 氦离子源脉冲电源的控制和放电电流的测试; 输出电子束电流的监测等。

5 初步实验结果

5.1 氦离子源的实验研究 从上述 WIP 电子枪的工作原理可知, WIP 电子枪的开启和关闭, 以及输出电子束特性均可通过开关和调节氦离子源的工作参量来控制 and 调节。因此, 对氦离子源通过实验研究获得使 WIP 电子枪正常运转的稳定放电条件, 是 WIP 电子枪实验研究的首要部分。

通过实验确定了可引发本 WIP 电子枪氦离子源稳定放电的最佳条件: 氦气压 p_{He} 为 $4Pa \geq p_{He} \geq 0.8Pa$; 调制器输出电压 V_m 的范围是: $4kV \geq V_m \geq 2kV$ 。

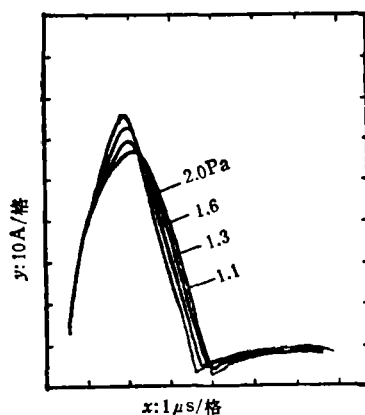


图3 氦离子源放电电流与氦气压的关系

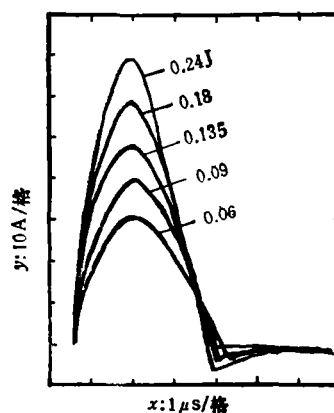


图4 氦离子源放电电流与调制器注入能量的关系

用 410 型 Pearson 脉冲电流变压器 (0.100V/1.0A) 和 Tektronix 7834 示波器, 监测氦离子源的放电电流波形。图 3、图 4 分别为改变氦气压和调节调制器注入氦离子源的能量时, 测得的两组放电电流波形。实验表明: (1) 当调制器注入离子源的能量一定

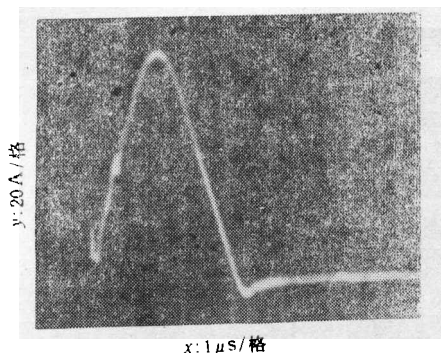


图 5 重复频率 100Hz 的氦离子源放电电流波形

时, 氦离子源放电电流 I_d 的幅值随氦气压 p_{He} 的升高而略有下降, 脉宽则稍变宽; (2) 当 p_{He} 固定时, I_d 的幅值则随调制器注入氦离子源的能量增大而增大, 脉宽则随之变窄。因而可很容易地通过变化氦离子源的上述参量, 来得到所需的放电电流幅值、脉宽和重复频率。

图 5 为氦气压为 1.3Pa、调制器工作电压为 4kV、重复频率为 100Hz 时测得的氦离子源放电电流波形。

5.2 电子束的输出特性

为了测量 WIP 电子枪的输出电子束参量, 我们分别用法拉第筒测电子束的电流密度, 用 Pearson 电流变压器测量电子束的总电流。法拉第筒装在电子束窗口外, 可沿导轨在整个窗口外移动。Pearson 电流变压器置于铝收集极的接地回路中。两种探测器均由 Tektronix 7834 示波器显示所监测的波形。图 6 为用 Pearson 电流变压器测得的 WIP 电子枪输出电子束电流波形。图 7 为用法拉第筒测得的电子束电流密度波形。以上仅在加速电压为 65kV 下测得的结果, 电子束电流为 2038 mA, 电子束电流密度为 8.15mA/cm², 脉宽为 10μs, 重复频率为 100Hz。这是因为 WIP 电子枪的加速电压受帕申击穿电压的限制。电子枪高重复频率运转时, 腔内放气和放电产生的杂质大大降低了帕申击穿电压。其原因是, 本 WIP 电子枪腔体和电极尺寸较大,

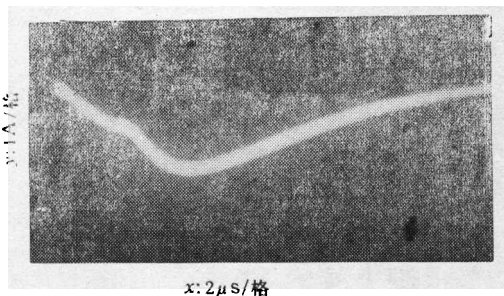


图 6 重复频率为 100Hz 的 WIP 电子枪输出电子束电流波形

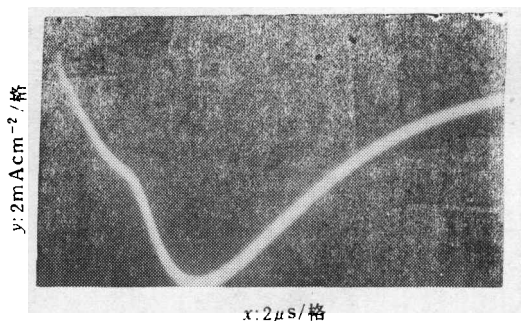


图 7 重复频率为 100Hz 的 WIP 电子枪输出电子束电流密度波形

不易对其表面进行有效的烘烤除气处理; 也由于经费所限, 本实验装置用现有的油扩散泵代替 WIP 电子枪所需的涡轮分子泵进行排气, 致使腔内存在油蒸气, 这些不利条件严重影响了加速电压的升高。故我们的初步实验大部分仅在加速电压 ≤ 65 kV 下进行。

6 讨论

研制高重复频率、大面积强流电子束源是我们的首次尝试,虽已取得初步成功,但也存在一些问题,需要进一步解决。

(1) 从本实验装置一年多来的初步实验研究结果表明:我们设计研制的 WIP 电子枪已成功地输出高重复频率运转的大面积低能强流电子束。输出电子束参量,在一定范围内,可很容易地由控制台遥控调节和控制。若有条件对腔体和电极进行除气处理,并采用无油涡轮分子泵,必将大大提高帕申击穿电压,完全有可能使本 WIP 电子枪的输出参量达到原设计指标。

(2) 我们实测的电子束电流脉宽 ($10\mu\text{s}$), 约比预计脉宽 ($1\mu\text{s}$) 大一个量级。这可能是由于存在高压辉光放电,在放电区内从电子束散射出的部分电子电离了一部分氢原子,产生的氢离子正好在电子束流脉冲尾部时间内被高压电场加速后,轰击高压阴极表面产生次级电子,致使输出电子束电流脉冲后沿拉长。Dihache 等人^[5]的实验表明,采用宽片提取栅,并减小栅条之间的间隔,可对阳极高压场起到静电屏的作用,可有效地使电子束电流波形的拖尾减小。

(3) 对于低能、高重复频率、大面积强流电子束输出,窗箔的寿命是个关键问题。虽然我们的 WIP 电子枪的输出窗口具有水冷装置,但由于存在上述问题,正常运转下输出的电子束电子能量小于 100keV ,而我们现有窗箔材料只有 $25\text{--}30\mu\text{m}$ 厚的钛箔和铝箔,显然低能电子束是无法透过的。目前电子束是在无窗箔情况下从 WIP 电子枪引出的,电子束参量的测量均在有机玻璃低气压室内进行。预计只要有 $10\mu\text{m}$ 厚的无针孔铝箔或钛箔,并经退火处理后,电子束输出是不成问题的。

参 考 文 献

- [1] 李悌兴,张奇,等. 新型低能电子加速器——WIP电子枪. 全国第三届高功率粒子束专业学术交流会论文报告集, I. 加速器技术,河北承德: 1988, 9.5—9.10.
- [2] Wakalopoulos G, Conti D K. Wire-Ion-Plasma(WIP): A Revolutionary New Technology for E-Beam Curing. Paper FC83—628, Proc. of Finishing'83 Conf. Cincinnati, OH, USA: October 11—13, 1983, 6.19—6.36.
- [3] Clark Jr W M, Dunning G J. IEEE J. of QE, 1978, QE—14(2): 126—129.
- [4] Wakalopoulos G. High Peak Power Pulsed WIP Electron Gun. LLNLUCRL-13950. Livermore, CA: 1978, 1—30.
- [5] Digache D, Bonnet J, David D. A Short Pulse Secondary Emission Electron Gun for High Pressure Gas Lasers and Plasma Chemical Reactors. in Sixteenth ICPIG. Dusseldorf: 1983, 782—783.
- [6] McClure G W. Appl. Phys. Lett. 1963, 2(12): 233—234.

A COMPACT HIGH REPETITION RATE ELECTRON BEAM ACCELERATOR WITH WIP ELECTRON GUN

Li Tixing Zhang Qi Tang Hongfang

Wang Dean Xia Nengqiao

Zheng Baohong

(Institute of Electronics, Academia Sinica, Beijing 100080)

Abstract The development of a compact high repetition rate electron beam accelerator is reported. The specifications of the device are output electron energy 120—150keV, beam current 5—50A, pulse duration $1\mu\text{s}$, beam cross-section $5\times 50\text{cm}^2$ and repetition frequency 100Hz. The key part of the accelerator is a wire-ion-plasma (WIP) electron gun of particular advantage. The principle of operation of the WIP electron gun and its physical properties are described. The calculation formula of output parameter is given and preliminary experimental results are presented.

Key words Electron beam accelerator, WIP electron gun, Helium ion source