

文章编号: 1001-4322(2000)03-0343-04

静电探针测量强流电子束电离气体产生的等离子体密度*

贾云峰, 钱宝良, 张建德, 刘永贵

(国防科技大学应用物理系, 长沙 410073)

摘 要: 用电离理论和核物理学中讨论电子束通过介质后的能量损耗的方法, 分别估算了强流电子束电离中性气体产生的等离子体的密度。在实验中将静电探针应用于测量强流电子束电离氮气产生的等离子体的密度, 得出等离子体密度随气压变化的曲线。实验结果表明在 1~15Pa 气压范围内, 等离子体密度在 $10^{10} \sim 10^{11} \text{cm}^{-3}$ 量级, 与理论结果相符, 证明静电探针用于诊断强流相对论电子束电离中性气体产生的等离子体的密度是可行的。

关键词: 强流相对论电子束; 等离子体密度; 静电探针

中图分类号: O53

文献标识码: A

某些高功率微波器件中, 当注入等离子体背景时, 不仅可以使自身的输出微波功率大幅度提高, 而且还可以使器件的相互作用效率成倍增长。理论和实验结果^[1-3]表明, 在这些器件中, 等离子体的密度对输出微波功率和相互作用效率影响很大。产生等离子体背景的方法之一是利用电子束电离中性气体直接产生等离子体^[1,2]。在具有等离子体背景的高功率微波器件中, 测量利用这种方法产生的背景等离子体的密度一直是有难度的课题, 主要是测量时难以排除高功率微波和电子束对等离子体诊断的干扰。目前, 已有学者采用微波干涉仪测量这种等离子体密度, 并取得了很好的结果^[2]。我们尝试用朗缪尔静电探针对背景等离子体的密度和寿命进行了测量, 得出了与理论计算相符的结果。

1 理论分析及估算

研究能量在 200~400keV 范围的电子束电离本底氮气产生的等离子体。实验所用的强流加速器是我室自行研制的 81-7M-01 双线加速器。在油线上产生的束流强度(真空情况下)约为 800A, 束脉宽约为 70ns, 产生的束电子能量平均值约 300keV。阴极为外径 6mm、内径 4mm 的空心阴极。波导管为内径 34mm、长 588mm 的黄铜光滑波导, 充以 1~15Pa 的氮气。

在低气压(低于 67Pa)小束流范围, 束流强度小于波导管的空间极限电流, 电子束前沿将不会形成阻碍电子束的深势阱。同时, 电子束实现电荷中和的时间比束脉冲的上升前沿长得多, 束前沿的径向电场将排斥二次电子到壁上, 而且由于波导管半径很小, 二次电子的逃逸时间很短, 电子雪崩的电离机制可以不予考虑, 主要的电离机制是电子碰撞电离机制^[4], 离子产生率可表示为

$$\frac{\partial n_i(t)}{\partial t} = \frac{n_b(t)}{\tau_e} = v_e(t) n_g(t) \sigma(t) \quad (1)$$

其中 n_g 为中性气体的密度; n_b 为电子束的束密度; τ_e 是电子与中性原子碰撞的特征时间; σ 为电子与中性气体原子的碰撞电离截面, 文献[5]给出了各种气体的电离截面的表达式 $\sigma = 1.874 \times 10^{-20} (M^2 x_1 + C x_2) (\text{cm}^2)$, 其中 M^2 和 C 均为常数。对于氮气, 其值分别为: $M^2 = 3.74$, $C = 34.84$, $x_1 = \beta^{-2} \ln[\beta^2 / (1 - \beta^2)] - 1$, $x_2 = \beta^{-2[5]}$, $\beta = v_e/c$, c 为光速。

为了对比, 同时用核物理学中讨论电子束通过气体介质后的平均能量损耗的方法作了近似的估算。

* 国家 863 激光技术领域资助课题
2000 年 1 月 19 日收到原稿, 2000 年 3 月 28 日收到修改稿。
贾云峰, 男, 1975 年 5 月出生, 博士生

我们假设: (1) 电子束损耗的能量完全用于电离; (2) 电子束平均每次电离损耗的能量大于介质原子中电子的逸出功, 多余部分转化为等离子体电子的动能。根据这条假设, 我们可以估计出等离子体的电子温度 $T_e = \Delta E_k - W$ (W 为电子的逸出功); (3) 电离后的等离子体完全充满整个波导管空间; (4) 电子束每次碰撞电离只产生一对等离子体电子和离子。强流电子束通过质量厚度为 Z_m 的任意介质后的能量损耗可以表示为^[6]

$$\Delta E(\text{keV}) = (0.78 - 0.0005E_0) \frac{E_0}{R_e} \left\{ Z_m - \frac{R_e}{1.29\pi} \left[\cos \frac{1.29\pi(Z_m + Z_i)}{R_e} - \cos \frac{1.29\pi Z_i}{R_e} \right] \right\} \quad (2)$$

其中 Z_m 、 R_e 分别为介质的质量厚度和质量射程, 单位为 $\text{mg} \cdot \text{cm}^{-2}$ 。在氮气中束电子每电离出一对电子和离子的平均能量损耗约为 33eV ^[6], 则总电离次数和等离子体密度易求得。由于氮气的电离能为 15.6eV , 所以电离出的等离子体电子温度约为 17.4eV 。

在典型的束电子动能约为 300eV 、二极管电压脉宽约为 70ns 、真空束流强度约为 500A 情况下, 充以 $1 \sim 15\text{Pa}$ 氮气时, 用电离理论和核物理方法估算得出的等离子体密度分别为 $1.4 \times 10^{10} \sim 2 \times 10^{11} \text{cm}^{-3}$ 和 $0.4 \times 10^{10} \sim 0.5 \times 10^{11} \text{cm}^{-3}$, 都在 $10^{10} \sim 10^{11} \text{cm}^{-3}$ 量级。用两种方法估算的结果与文献[1]中提到的值基本相符。

2 实验方案及装置

2.1 实验方案

强流电子束电离中性气体产生的等离子体的寿命短, 不稳定性严重, 分布不均匀, 等离子体的密度与气压、二极管电压和电流都有很大关系。用探针测量这种等离子体的主要困难在于: (1) 漂移管空间存在强磁场; (2) 电子束可能与波导管中的等离子体相互作用产生很强的微波辐射; (3) 探针会遭受电子束的轰击; (4) 有用信号的提取问题; (5) 探针的响应问题。

由于实验对象的特殊性, 因此我们的波导管和探针电路采用以下一些结构来克服测量中的困难。(1) 有强磁场存在时, 探针上的饱和电子流大大降低, 而饱和离子流基本不受影响。将探针工作点选择在饱和离子流区, 就可避开强磁场的影响。(2) 采用光滑波导来传输强流电子束, 从而达到部分消除微波干扰的目的。(3) 电子束轰击到探针上, 会在极短时间内产生负电荷的积累从而产生很大的脉冲信号, 为了能从时间上将电子束的影响排除而提取出所需等离子体信息, 选取了相对于电子束脉宽大得多的示波器时标。等离子体的寿命为百微秒量级, 扫描出完整的探针伏安特性曲线有较大难度。因此使探针工作点处于饱和离子流区, 通过从理论上估算等离子体电子温度来求得密度。(4) 当探针工作于饱和离子流区时, 离子鞘层厚度的变化主要由电子的运动引起, 响应时间约为 10ns 。

2.2 实验装置

电子束传输的波导管结构如图 1 所示。电子束的运动用外加强磁场控制, 不加慢波结构避免了高功率微波的产生。波导管的另一端用中心有同轴密封接头的法兰盘联接以保证密封, 同时用作引入探针电路。静电探针电路如图 2 所示。全部结构均采用同轴结构, 以消除快脉冲信号对电路的影响。同轴电池组用来给探针加上约 -50V 的偏压。用 0.8Ω 的同轴无感小电阻提取探针上的等离子体饱和离子流, 送至 HP54502A 数字示波器进行测量。

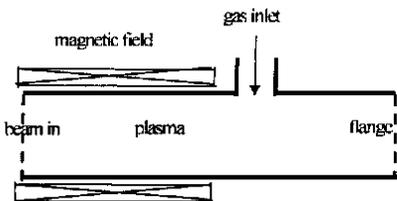


Fig. 1 Configuration of guide tube

图 1 波导管结构

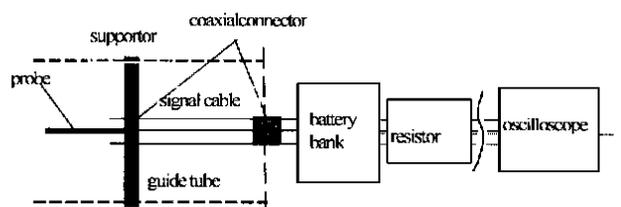


Fig. 2 Configuration of probe circuit

图 2 探针电路结构图

3 实验结果及讨论

典型的无感小电阻上的信号如图 3 (a) 所示。由图 3 (a) 及 3 (b) 我们可以清楚地看到饱和离子流的存在。在电子束到达后大约 70~ 100μs, 电子束的影响完全消失, 等离子体离子流达到饱和。此时的电压

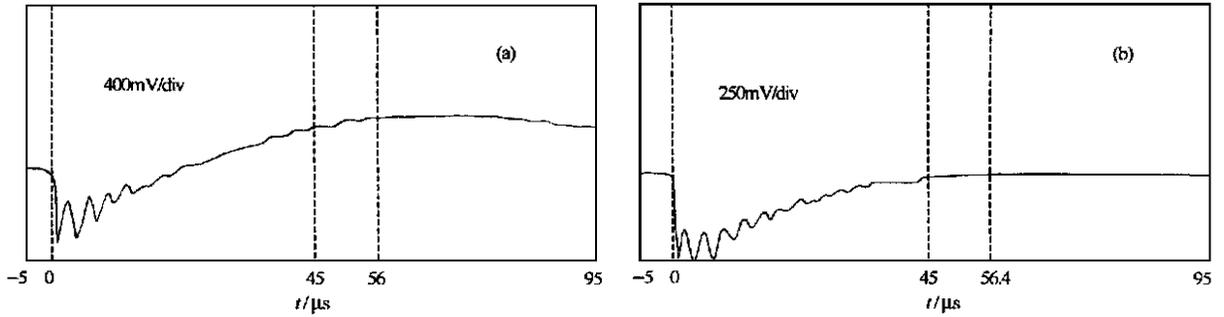


Fig. 3 Typical saturation ion current of plasma(a), signal of probe in condition of vacuum (b)

图 3 (a) 典型的等离子体饱和离子流; (b) 真空情况的探针信号

与初始电平的差值 ΔV 即为无感小电阻 R 上的电压, 它与饱和离子流 I_{is} 的关系为

$$\Delta V = R I_{is} \tag{3}$$

饱和离子流与等离子体密度之间的关系为^[7]:

$$I_{is} = 2 \times 10^{-15} \sqrt{Z S n_i} \sqrt{k T_e} \tag{4}$$

式中, Z = 7 为氮气的原子序数; kT_e (eV) 为等离子体温度, 在我们的实验情况下, kT_e = 15eV; S = 2π × 2 × 10⁻⁵ cm² 是探针的表面积, 通常用来代替探针收集等离子体饱和离子流的有效面积^[8]。

由式 (3) 和 (4) 知道等离子体密度 n_i 与无感小电阻上的电压 ΔV 是一一对应的线性关系, 因此由不同气压下 ΔV 的变化值即可得到不同气压下等离子体密度的变化范围, 如图 4。作为对比, 也给出了根据电离理论估算的等离子体密度随气压变化的曲线。

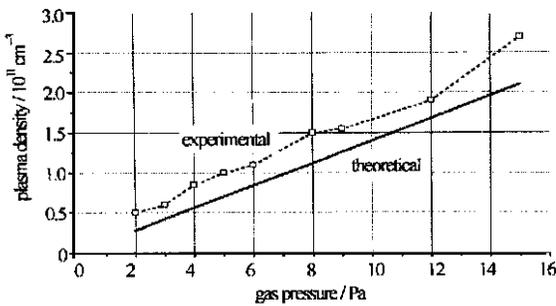


Fig. 4 Solid: theoretical results according to electron impact ionization,

dash: experimental results of plasma density measured by Langmuir probe

图 4 实线: 电离理论所得的理论结果; 虚线: Langmuir 探针所测得的实验结果

由图中可以看出, 当充气气压从 2Pa 至 15Pa 逐渐增大时, 实验测得的等离子体密度从 0.5 × 10¹¹ cm⁻³ 逐渐增大到 2.7 × 10¹¹ cm⁻³, 变化近似为线性的。同时, 理论计算的结果比实验所测的结果偏小, 我们认为原因在于理论计算时仅仅考虑了电子碰撞电离的贡献, 而实际上除此之外还有二次电子的贡献、离子电离等机制起作用。另外, 实际上电子速度随时间而减小, 电离截面随时间而增大, 因而离子产生率随时间而增大, 并不是象理论分析所假设的保持恒定, 这也造成了理论值相对实验值偏小。但总的来说, 电子碰撞电离是主要的电离机制, 理论分析与实验结果基本相符。如图 5, 等离子体寿命大约为 450μs。

4 结 论

用朗缪尔探针测量了电子束电离氮气产生的等离子体的密度和寿命。结果表明, 等离子体密度随气

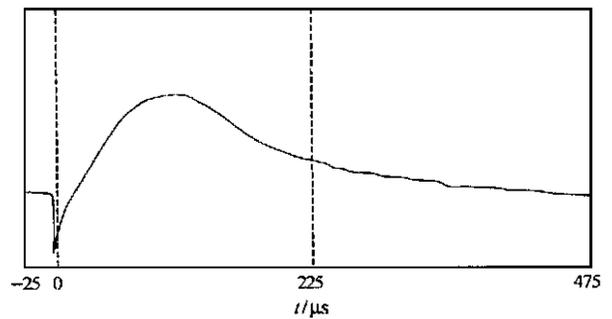


Fig. 5 Lifetime of plasma

图 5 等离子体寿命

压增大而增大, 在气压 1~ 15Pa 范围内, 等离子体密度基本处于 $10^{10} \sim 10^{11} \text{cm}^{-3}$ 量级, 与理论估算结果在数量级上是相符的。等离子体的寿命大约为 $450 \mu\text{s}$ 。实验结果表明, 在一定条件下, 静电探针测量系统作为一种简单的诊断手段, 应用于测量电子束电离中性气体产生的等离子体是可行的。

参考文献:

- [1] 钱宝良 具有等离子体背景或电介质衬套的返波振荡器[D]。北京: 清华大学, 1996
- [2] Zhai Xiaoling, et al Experiment study of a plasma-filled backward wave oscillator[J]. *IEEE Trans on Plasma Sci*, 1993, **21**(1): 142
- [3] Botton B. Plasma filled backward wave oscillator without an axial magnetic field[J]. *Appl Phys Lett*, 1992, **60**(18): 2198
- [4] 米勒 R B. 强流带电粒子束物理学导论[M]。北京: 原子能出版社, 1988
- [5] Rieke Foster F, and Prepejchal William. Ionization cross section of gaseous atoms and molecules for high-energy electrons and positrons[J]. *Physics Review A*, 1972, **6**(4): 1507.
- [6] 楼祺洪等. 脉冲放电气体激光器[M]。北京: 科学出版社, 1993 106
- [7] 项志遴, 俞昌旋等. 高温等离子体诊断技术[M]。上海: 上海科学技术出版社, 1982
- [8] Huddleston Richard H. Leonard Stanley L, et al Plasma diagnose technique[M]。New York, London: Academic Press, 1965

USING LANGMUIR PROBE TO DIAGNOSE PLASMA PRODUCED BY RELATIVISTIC ELECTRON BEAM IONIZING NEUTRAL GAS

JIA Yun-feng, QIAN Bao-liang, ZHANG Jian-de, LU Yong-gui

Department of Applied Physics, National University of Defense Technology, Changsha, 410073

ABSTRACT: We estimated the plasma density produced by relativistic electron beam (REB) ionizing neutral gas, using both ionization theory and another method employed often to study energy losses of electron beam transporting through matter in nuclear physics. On experiment, Langmuir probe is employed to measure the plasma density produced by REB ionizing N_2 , and the curve that plasma density varies with gas pressure was obtained. The experimental results indicate that plasma density in low pressure (1~ 15Pa) region is in the order of $10^{10} \sim 10^{11} \text{cm}^{-3}$, which coincides with theoretical estimation, and the method using probe to diagnose plasma produced by REB ionizing neutral gas was feasible.

KEY WORDS: relativistic electron beam; plasma density; Langmuir probe