

文章编号 :1001-4322(2004)04-0535-05

高功率离子束在偏压电荷收集器内部的电荷输运模拟*

李洪玉¹, 何小平², 孙剑锋², 杨海亮², 邱爱慈^{1,2}

(1. 西安交通大学 电气工程学院, 陕西 西安 710049; 2. 西北核技术研究所, 陕西 西安 710024)

摘 要: 利用 2.5 维 KARAT 软件对高功率离子束在偏压电荷收集器内部的电荷输运过程进行 PIC 数值模拟, 模拟结果表明在偏压电荷收集器内部电荷中和而电流不中和。在模拟中考虑了收集器的几何尺寸和离子束密度, 因此模拟结果比一维数值计算的结果更为可靠。同时还模拟了偏置电压与电荷收集器离子收集效率之间的关系, 对于峰值能量为 500keV 的高功率离子束, 偏压为 -800V 即可满足测量要求, 这一结果与实验吻合较好。

关键词: 高功率离子束; 偏压电荷收集器; 电荷输运

中图分类号: TL506

文献标识码: A

高功率离子束 (HPIB), 也称强流脉冲离子束 (IPB), 在离开二极管后的传输过程中几乎全部电流中和及空间电荷中和, 表现为一种准中性的带电离子团, 因而不能用常规的电磁手段 (如罗柯夫高斯基线圈和法拉第筒) 测量其束流强度。电荷收集器 (也称法拉第筒) 是一种简单实用的带电粒子测量装置, 在等离子体物理和束流物理实验中经常使用, 根据测量对象和测量目的的不同, 其形式和结构各不相同。在电荷收集器的收集体上加一定的负偏压, 可以抑止 HPIB 中的中和电子进入收集体, 因而偏压电荷收集器可以作为 HPIB 的测量装置^[1-3]。

偏压电荷收集器的结构虽然简单, 但其内部存在着复杂的带电粒子输运过程, 再加上不能直接标定, 人们对其测量结果的准确性一直表示怀疑。文献[3]利用一维数值计算模拟了 HPIB 在偏压电荷收集器内部的传输过程和偏压的大小对测量结果的影响, 证明了这种装置测量的可靠性。但其解释和分析都必须首先假设 HPIB 在偏压电荷收集器内部已经电荷中和。本文利用 2.5 维的 KARAT 软件模拟了 HPIB 在偏压电荷收集器内部的电荷输运过程, 模拟结果表明, HPIB 在偏压电荷收集器内部的确电荷中和, 但电流不中和。从而证实了文献[3]的电荷中和假设, 同时也进一步证明了利用偏压电荷收集器测量 HPIB 的准确性。通过对偏置电压对电荷收集器离子收集效率的影响的模拟, 确定了合理的偏置电压取值。与“闪光二号”加速器上实验测量结果的对比, 两者所确定的偏压取值吻合较好。

1 偏压电荷收集器内部的电荷输运过程模拟

图 1 是偏压电荷收集器的结构原理图^[1], 它由采样针孔、收集体、屏蔽外壳、绝缘支撑和偏压电路组成。

HPIB 离开加速器二极管区域后, 其内部强大的库仑力势必会从二极管阴极和漂移管管壁引入大量的电子使得空间电荷中和, 否则 HPIB 就无法传输, 同时中和电子使电流中和。在收集体上加一定的偏压, 可以抑止 HPIB 中的中和电子进入收集体, 进入收集体的离子流通过隔直电容在信号采集电阻 R 上产生一个压降 V_{out} , 如果针孔面积 A_c 已知, 就可以求出离子束束流密度 J_{ion} 。偏压电荷收集器偏压的大小取决于中和电子的能量, 对于能量为 E_i 的离子束, 中和电子的能量为 $(m_e/m_i) E_i$, 偏压应至少大于 $(m_e/m_i) E_i/e + V_{out}$, V_{out} 为输出信号, $V_{out} = J_{ion} A_c R$, R 为信号采集电阻。

偏压电荷收集器虽然通过采样针孔来测量小部分的离子束束流, 但是即使是这一小部分的束流也足够强, 会在电荷收集器内部产生强烈的空间电荷效应。文献[3]利用一维数值计算模拟了偏压电荷收集器内部离子

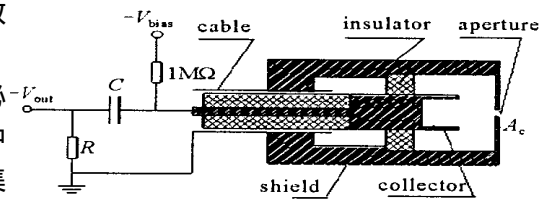


Fig. 1 Biased charge collector and biased circuit

图 1 偏压电荷收集器及偏压电路

* 收稿日期:2003-06-30; 修订日期:2003-10-20

基金项目:国家自然科学基金资助课题(19975037); 西北核技术研究所基金资助课题

作者简介:李洪玉(1978—), 男, 硕士生, 西安市 69-10 信箱; E-mail: dongbeihly@163.com。

束的电荷输运过程。它的模型由准直孔平板、收集体平板和偏压电源组成(图 2(a)),其中 ϕ_b 、 ϕ_f 、 ϕ_{ic} 和 ϕ_c 分别表示离子束、收集器外壳、收集器内部离子柱和收集体的电位。电荷、电流中和的离子束 ($\rho_e + \rho_i = 0, J_e + J_i = 0$) 从准直孔左侧注入,注入的电子和离子的特征参数为:电子温度 T_e ,电子密度 n_e ,离子漂移速度 v_i 和离子密度 n_i 。离子和中和电子在收集器内部的分布如图 2(b) 所示,其中

$$f_i(v) = n_i (v - v_i) \tag{1}$$

$$f_e(v) = n_e \left(\frac{m_e}{2kT_e}\right)^{1/2} \exp\left[-\frac{m_e(v - v_i)^2}{2kT_e}\right] \tag{2}$$

式中: m_e 为电子静止质量; k 为波耳兹曼常数。

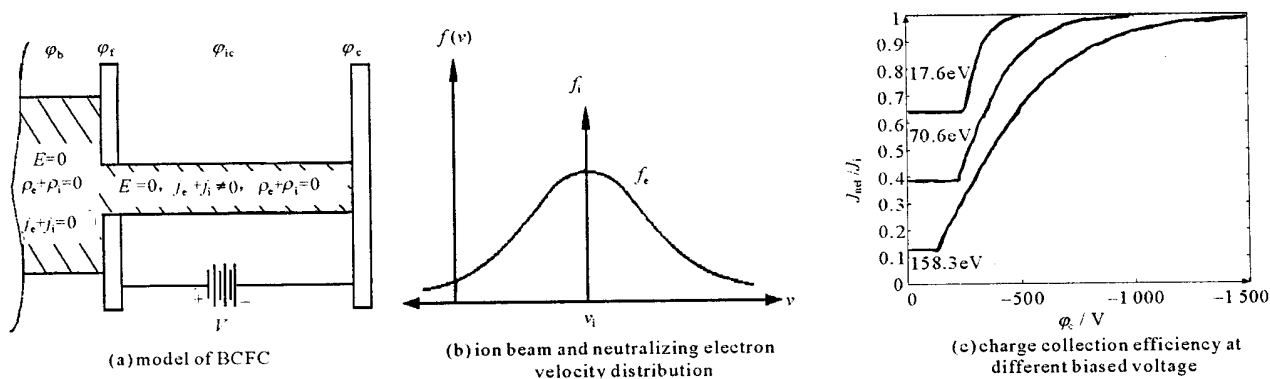


Fig. 2 Numerical simulation of biased charge collector^[3]

图 2 偏压电荷收集器的数值模拟^[3]

离子束进入偏压电荷收集器后,在偏压的作用下,空间电荷效应使得离子束电荷中和 ($\rho_e + \rho_i = 0$),但电流不中和 ($J_e + J_i \neq 0$),离子流密度 J_i 和电子流密度 J_e 分别为

$$J_i = en_i v_i \tag{3}$$

$$J_e = \begin{cases} -e \int_0^{v_i} v f_e(v) dv, & \phi_{ic} < \phi_c \\ -e \int_0^{v_i} v f_e(v) dv + [2e(\phi_{ic} - \phi_c)]^{1/2} \int_{v_i}^{\infty} v f_e(v) dv, & \phi_{ic} < \phi_c \end{cases} \tag{4}$$

当 $v > 0, f_e(v) = n_e (m_e/2kT_e)^{1/2} \exp[-m_e(v - v_i)^2/2kT_e]$, 当 $v < 0$ 时, $f_e(v) = 0$ 。进入收集体的电流密度为

$$J_{net} = J_i + J_e \tag{5}$$

根据以上公式,文献[3]计算出了偏压电荷收集器测量 360keV 离子束时,三种温度下离子收集效率 J_{net}/J_i 与偏压之间的关系(如图 2(c))。

以上的分析只是一维数值模拟,没有考虑 HPIB 的强度和偏压电荷收集器的结构,而且必须先假设在收集器内部电荷中和,即 $n_e = n_i = n_0$ 。为了验证这个假设是否成立,我们利用 2.5 维的 KARAT 软件对 HPIB 在偏压电荷收集器内部的电荷输运过程进行 PIC 数值模拟,图 3(a) 是偏压电荷收集器的 KARAT 模型,模型为轴对称的几何结构, z 轴为对称轴,模型的几何尺寸与实际电荷收集器的几何尺寸一致,针孔直径为 0.6mm,厚为 0.5mm。“闪光二号”加速器上产生的 HPIB 的脉宽为 80ns 左右,电子和离子的温度为 eV 量级,文献[5],[6]表明可将模拟时间压缩至 ns,将温度人为提高 3~4 个量级对结果无明显影响,这样就可以在满足网格长度与德拜长度相当而远小于无碰撞趋肤深度的条件下,使被跟踪的粒子数减少几个数量级,使计算量大大减少。因此在模拟中,模拟时间取 4ns。束流密度为 500A/cm² 时,模拟中取等离子体的特征参数为:密度取 $n_i = n_e = 10^{13}$ cm⁻³,温度设为 200eV,质子峰值能量为 500keV,这样取质子的漂移速度为 9.8×10^6 m/s。假设电子与质子的漂移速度相等,电子峰值能量取 260eV。等离子体区域长度取 1.2cm,半径取 0.15cm,偏置电压为 -800V。轴向和径向网格取 0.1mm。图 3(b) 是在上述条件下经过 2.0ns 后电子和离子的运动分布,说明在收集器内部电荷中和,只有零星的电子进入收集体。图 3(c) 为不同时刻电子和离子的数量,说明在收集器内部电荷中和,即 $n_e = n_i = n_0$ 。图 3(d) 模拟的是 4ns 内的离子流波形,计算得到收集器收集到的电荷数是 3.43×10^{10} ;根据由漂移

管中入射进来的等离子体密度和体积,可以计算理论上电荷收集器能够收集的电荷数为 3.67×10^{10} ,因此收集器的离子收集效率为 93.3%。考虑被准直孔壁收集的那部分粒子和少量的中和电子入射到收集体,收集器的离子收集效率已经很高。

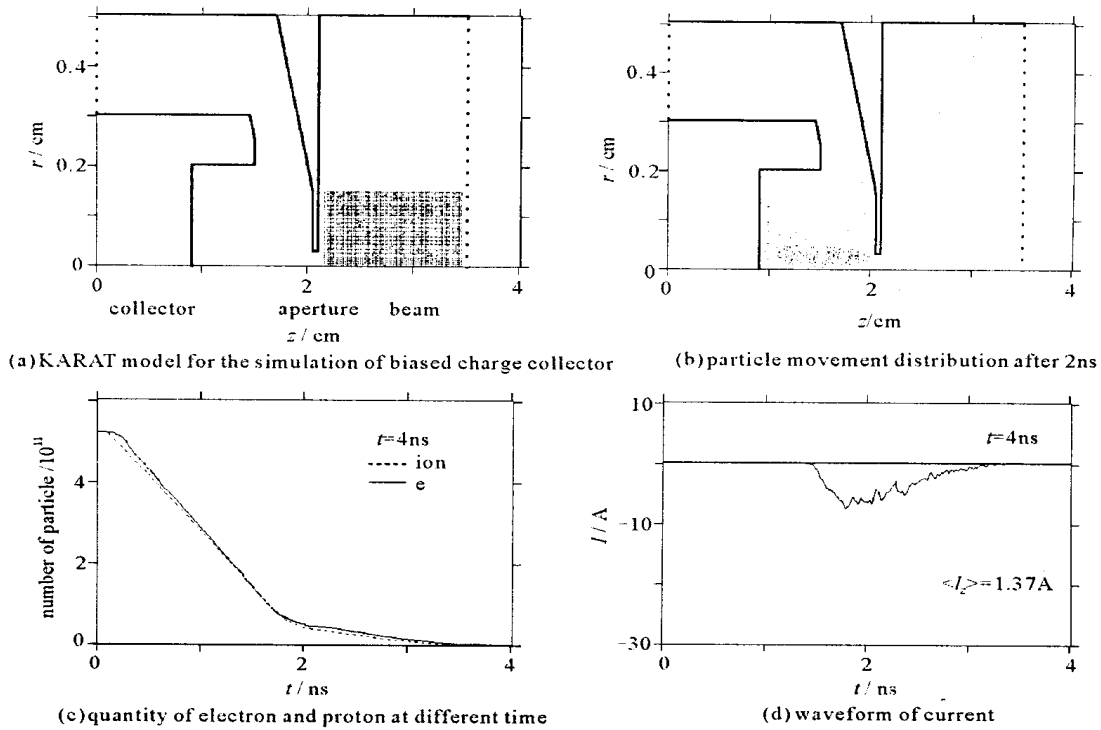


Fig. 3 Simulation of charges propagation within biased charge collector by KARAT code

图 3 利用 KARAT 程序模拟偏压电荷收集器内部的电荷输运

2 偏置电压对电荷收集器的影响

2.1 偏置电压对电荷收集器测量影响的数值模拟

文献[3]利用数值计算模拟了偏压大小对 360keV 高功率离子束测量结果的影响,本文利用 KARAT 软件也模拟了偏压对测量结果的影响。中和电子大部分是由离子束电场从二极管阴极和漂移管内壁拉出来及由电离背景气体产生的,中和电子峰值能量取 260eV。代入 $(m_e/m_i) E_i/e + V_{out}$,考虑到中和电子的高能部分,偏压还需要有一定的余量,计算得到理论上的偏压必须高于 -350V,以下分别对偏置电压为 -300 ~ -1500V 进行模拟对比,模拟时只改变偏置电压的大小,其它参数不变,模拟的计算条件与上一节相同。所以理论上能够收集到的电荷数为 3.67×10^{10} 。根据模拟离子流波形可以计算出收集到的电荷数,由此算出不同偏

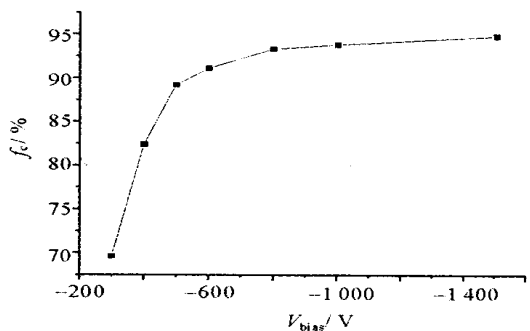


Fig. 4 Charge collection efficiency at different biased voltage

图 4 不同偏压下的电荷收集效率

压下的离子收集效率,如图 4 所示。从模拟结果可以看出,偏压高于 -800V 以后,电荷的收集效率已经接近饱和,继续增大偏压增益已不明显。另外实际测量中,考虑到偏压电荷收集器的绝缘问题,偏压也不可能无限增大。模拟结果比文献[3]的计算结果略小,由于我们模拟采用的是 2.5 维的 KARAT PIC 程序,在模拟中考虑了收集器的几何尺寸和离子束密度,因此模拟结果比一维数值计算的结果更为可靠。

2.2 实验测量与数据分析

高功率离子束产生实验是在“闪光二号”加速器正极性状态下开展的,二极管为箍缩反射离子束二极管,阴极材料为高密度石墨,阳极为聚乙烯薄膜。我们利用偏压电荷收集器阵列测量离子束的分布。二极管峰值电压为 500kV 左右时,电荷收集器的偏压取 -750V,对其它不同大小的偏压进行对比,每一炮中 3 与 4,5 与 6,11

与12通道处于对称位置,分别距束中心16,32和48mm。表2是偏压电荷收集器在不同偏压下测得的束流密度,相同条件下,偏压为-200,-360和-540V所测得的束流密度分别是偏压为-750V的50.6%,74.3%和92.1%。由此实验得出:电荷收集器的收集体和准直孔之间加一定的负偏压可以显著抑制中和电子进入收集体,而且通过在不同偏压下的实验比较可知,电荷收集器所加偏压在-800V左右即可。

表1 偏压电荷收集器在不同偏压下测得的束流密度(A/cm^2)比较

Table 1 Beam current density (A/cm^2) get from biased charge collector at different biased voltage

No	41 #		37 #		38 #	
	- 750	- 200	- 750	- 360	- 750	- 540
ch3 / ch4	451	272	345	287	410	389
ch5 / ch6	392	179	320	213	402	377
ch11 / ch12	287	121	198	141	341	279

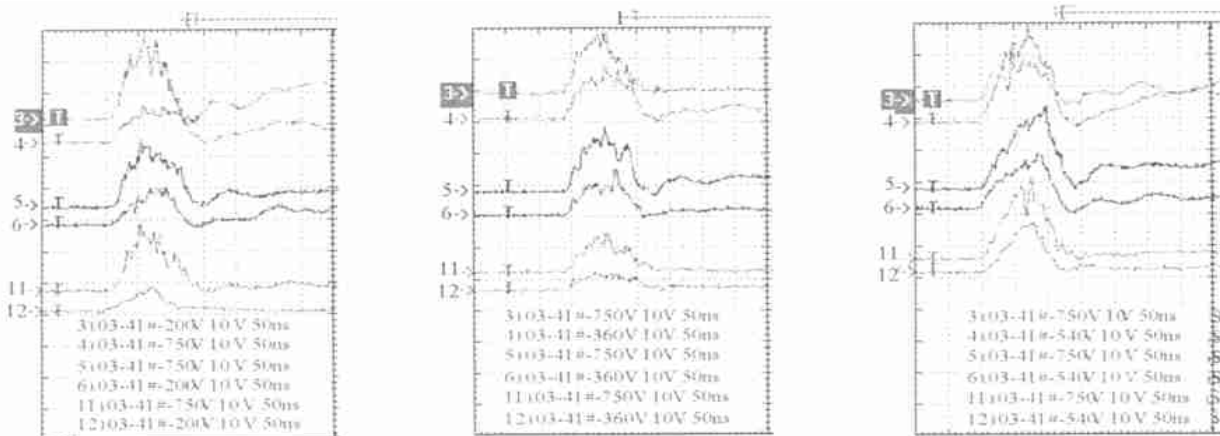


Fig. 5 Waveforms at different biased voltage

图5 不同偏压下实验所测得的波形对比

3 结论

利用2.5维KARAT PIC程序对HPIB在偏压电荷收集器内部的输运过程进行模拟,模拟结果表明HPIB在偏压电荷收集器内部电荷中和而电流不中和,模拟结果验证了文献[3]的假设,从而进一步验证了利用偏压电荷收集器测量HPIB结果的可靠性。另外在模拟中考虑了收集器的几何尺寸和离子束密度,因此模拟结果比一维数值计算的结果更为可靠。偏置电压对电荷收集器影响的模拟结果表明,对于峰值能量为500keV的HPIB,为了有效地抑制低能中和电子,偏压的大小取-800V比较合适,这一结果与实验吻合较好。本文的有关工作可为利用偏压电荷收集器测量强流脉冲离子束束流密度分布提供理论参考。

致谢 衷心感谢西北核技术研究所“闪光二号”运行组的同志为实验所付出的辛勤劳动,以及汤俊萍、任书庆、陈玉兰等同志的指导和帮助。

参考文献:

- [1] 何小平,石磊,张嘉生,等. 用偏压法拉第筒测量强流脉冲离子束[J]. 强激光与粒子束,2000,12(6):753-755. (He X P, Shi L, Zhang J S, et al. Mini biased collimated Faraday cups for measurement of intense pulsed ion beams. *High Power Laser and Particle Beams*, 2000,12(6):753-755)
- [2] Eichenberger C, Humphries S, Maenchen J, et al. Measurement of 400-MW/cm² proton fluxes[J]. *J Appl Phys*, 1977,48:1449-1455.
- [3] Kraft R, Kusse B R. Biased charge collector analysis for intense ion beam measurements[J]. *J Appl Phys*, 1987,61(6):2123-2127.
- [4] Tarakanov. KARAT user manual[Z]. USA:Berkeley Research Associates, Inc, 1998.
- [5] 曾正中,邱毓昌,邱爱慈. POS工作参量定标关系的数值模拟[J]. 电工电能新技术,1999,18(4):5-8. (Zeng Z Z, Qiu Y C, Qiu A C. Numerical simulation of the scaling of POS operating parameters. *Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy*, 1999,18(4):5-8)
- [6] Swanekamp S B, Grossmann J M, Fruchtman A, et al. Particle-in-cell simulations of fast magnetic field penetration into plasmas due to the Hall electric field[J]. *Phys Plas*, 1996,3(10):3556-3563.
- [7] Grossmann J M, Ottinger P F, Neri J M, et al. Numerical simulation of a low-density plasma erosion opening switch[J]. *Phys Fluids*, 1986,29(8):2724-2735.

Simulation of HPIB propagation in biased charge collector

LI Hong-yu¹, HE Xiao-ping², SUN Jian-feng², YANG Hai-liang², QIU Ai-ci^{1,2}

(1. Institute of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. Northwest Institute of Nuclear Technology, P. O. Box 69-10, Xi'an 710024, China)

Abstract : A 2.5D PIC simulation using KARAT code for inner charge propagation within biased charge collector for measuring HPIB is presented. The simulation results indicate that the charges were neutralized but the current non-neutralized in the biased charge collector. The influence of ions collected vs biased voltage of the collector was also simulated. - 800V biased voltage can meet the measurement of 500keV HPIB, and this is consistent with the experimental results.

Key words : High power ion beams; Biased charge collector; Charge propagation

~~~~~

《强激光与粒子束》2003 年发表论文被 EI 收录情况  
(截止 2003 年 10 期)

| 期     | 1  | 2  | 3  | 4  | 5  | 6  | 7  | 8  | 9  | 10 |
|-------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| 发表论文数 | 25 | 25 | 25 | 26 | 26 | 25 | 26 | 24 | 23 | 25 |
| 收录论文数 | 9  | 10 | 10 | 13 | 9  | 11 | 13 | 16 | 14 | 13 |
| 收录率/% | 36 | 40 | 40 | 50 | 35 | 44 | 50 | 67 | 61 | 52 |

(《强》刊编辑部 汪道友)