

文章编号: 1001- 4322(2000)02- 0245- 04

# 电子束的收集\*

杨晓东, 宋明涛, 夏佳文, 魏宝文

(中国科学院近代物理研究所, 兰州市 31 号信箱, 730000)

**摘要:** 为提高电子冷却装置中收集器的效率, 研究了收集效率与几何参数和电、磁参数的关系, 考虑了初级及反射电子的空间电荷作用, 模拟计算了初级电子、反射电子在收集器区域的轨迹, 由此得到了收集效率随电、磁参数的变化规律。结果表明, 在合适的参数设置下, 相对电流损失小于  $1 \times 10^{-4}$ , 收集效率达到 99.99%。

**关键词:** 收集器; 收集效率; 电子束

**中图分类号:** TL 503.91

**文献标识码:** A

在电子冷却装置<sup>[1]</sup>中, 电子束与离子束相互作用之后, 经过一个弯曲螺线管进入减速段, 当能量降低到几个 keV 时, 电子束进入收集器。收集器的作用是尽可能高效率地吸收这部分能量, 进而俘获电子, 电子动能转化为热能后, 由冷却水带走。提高收集效率<sup>[2,3]</sup>的目的在于改善真空状况, 降低高压电源的负载电流, 特别是高能情况下尤其重要。首先, 在非常高能的情况下, 高压电源的负载电流是有限制的。其次, 高压电源稳定度要求非常高, 而损失的电流反过来影响高压电源的调整。第三, 在高能情况下, 损失的电子沉积在电极上的数量非常高, 在这个过程中产生的 X 射线将会损坏系统。对于初级电子束来说, 收集器能够完全吸收; 由初级电子轰击收集器表面产生的二次电子, 收集器应约束这些电子使其尽可能少地逃逸出收集器, 同时还应尽可能降低消耗功率。

## 1 收集器的结构、参数

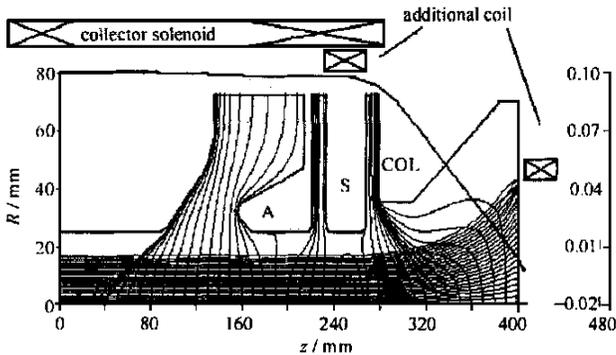


Fig 1 Scheme of collector

A -anode; S-suppressor; COL -collector cup

图1 收集器示意图

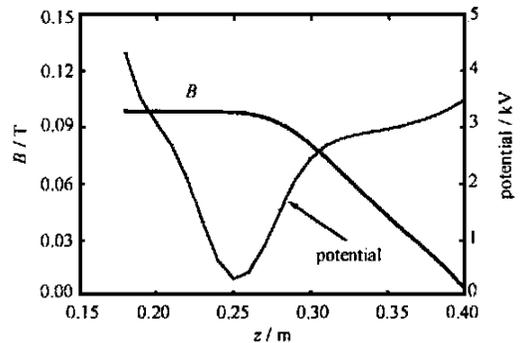


Fig 2 The potential and magnetic field distribution

along the axis of the collector

图2 收集器轴线上电位及磁场分布

一般来说, 收集器由收集器阳极、抑制极、收集杯及附加线圈构成, 同时位于收集器直螺线管的端部, 处于下降的磁场区域, 收集器的结构如图 1 所示。当初级电子到达收集器区域时, 先被减速, 然后又被加速进入收集杯。此时电子能量约为几个 keV, 轰击收集杯表面会产生二次电子。二次电子的能谱在接近入射能量处有一个峰值, 大部分电子能量低于入射能量<sup>[4-6]</sup>。低能量的为真正的二次电子, 称为慢

\* 国家重大科学工程 HIRFL-CSR 冷却储存环项目资助课题  
1999年8月7日收到原稿, 2000年3月9日收到修改稿。  
杨晓东, 男, 1966年3月出生, 硕士, 副研究员

电子, 而接近入射能量的这一部分为弹性反射的电子, 称为快电子。快电子的角分布为余弦形状, 即在完全弹性散射的方向最多。

为了尽可能多地收集二次电子, 在收集器设计上采用静电透镜和磁镜两种方式, 如图 2 所示, 静电透镜在收集器区形成一个位阱, 位阱允许初级电子进入; 对于二次电子为一反射镜, 阻止二次电子逃逸出收集器。磁镜实际为一负梯度(相对于初级电子的前进方向)磁场, 该场将初级电子的横向能量转化为纵向能量。反过来, 对于反方向运动的二次电子来说, 一方面, 将纵向能量转化为横向能量, 增大电子回转半径, 使其在较短的路程内撞击到电极上; 另一方面, 当纵向速度降为零时, 电子就被反射回去, 磁镜能有效地捕捉能量较高的电子。为了定量地描述收集器的性能, 定义收集效率为

$$\eta = 1 - (I_{\text{loss}}/I_{\text{beam}}) \quad (1)$$

其中:  $I_{\text{loss}}$  为逃逸的电流,  $I_{\text{beam}}$  为初级电流,  $I_{\text{loss}}/I_{\text{beam}}$  为相对电流损失。

在实际的电子冷却装置中, 从收集器逃逸出的二次电子在弯曲螺线管区域的离心漂移抑制线圈磁场的作用下, 最终将打在接地的真空管壁上, 这些电子为高压电源的负载电流。在实验中, 只需测量该负载电流, 就可计算出收集效率。

## 2 影响收集效率的因素

如上所述, 收集器由几个不同形状、不同尺寸的电极和线圈组成, 几何因素、静电因素、磁因素直接影响其收集效率。显然最基本的要求是收集器阳极、抑制极和收集杯的内径都要大于束流直径, 初级电子完全进入收集杯。从图 2 可以看出, 调节抑制极的电位可以在其附近形成一个位阱, 最小值为  $U_{\text{min}}$ 。如果  $U_{\text{min}}$  太小, 考虑到初级电子空间电荷作用所引起的位降, 这个值可能小于零, 也就是说初级电子会被反射回去。而  $U_{\text{min}}$  太大, 由收集杯表面发出的二次电子会获得能量而跃过位阱, 逃逸出去。

由经典电动力学可知<sup>[7]</sup>, 对于二次电子而言, 存在捕集判据

$$|v_{\parallel}/v_{\perp}| < (B_{\text{max}}/B_0 - 1)^{1/2} \quad (2)$$

如果带电粒子在磁场的空间变化很缓慢的区域运动, 穿过粒子轨道的磁通量保持不变。如果镜内最大感应强度  $B_{\text{max}}$  与中央区域磁感应强度  $B_0$  的比值非常大, 只有纵向速度分量非常大的粒子才能穿过两端。

### 2.1 几何因素

如果没有磁镜, 没有位阱, 由收集器底部产生的二次电子的出射角度  $\beta$  满足:  $\beta_{c1} < \beta < \beta_{c2}$ , 这种电子将逃逸出收集器。  $\beta_{c1} = \arctan[(r_s - r_{\text{min}})/L_{\text{min}}]$ ,  $\beta_{c2} = \arctan[(r_s - r_e)/L]$ , 其中:  $r_e$  为收集器出口电极孔半径,  $r_s$  为收集器表面半径,  $r_{\text{min}}$  为由  $r_s$  位置出发的直线能够射出收集器所遇到的电极的最小半径,  $L$  为收集器底部到电极的距离,  $L_{\text{min}}$  为收集器底部到  $r_{\text{min}}$  电极的距离。这个角度随着收集器底部发射位置  $r_s$  的变化而变化。另一方面, 电子实际上是沿着磁力线运动的, 电子离开收集器底部表面后, 其速度方向发生了很大的变化, 所以只需考虑出射电子速度与磁力线之间的夹角这一判据。

### 2.2 磁镜因素<sup>[8]</sup>

如果收集器底部表面处磁感应强度为  $B_{\text{col}}$ , 收集器出口附近位阱处的磁感应强度为  $B_{\text{min}}$ 。由收集器表面发射出的电子逃逸判据为:  $\theta < \theta_c$ ,  $\theta$  为电子速度与磁力线的夹角,  $\sin^2 \theta_c = B_{\text{col}}/B_{\text{min}}$ 。在收集器底部二次电子呈余弦分布:  $d\sigma/d\Omega = (\sigma_0/\pi) \cos \theta$  其中,  $\sigma_0$  为总的二次电子发射系数。

在磁镜出口场线与轨迹夹角  $\theta$ , 相应的立体角为  $d\Omega_1$ ,  $\sin \theta = (B_{\text{min}}/B_{\text{col}})^{1/2} \sin \theta_c$ ,  $d\Omega_1 = d\Omega [(B_{\text{min}} \cos \theta)/(B_{\text{col}} \cos \theta_c)]$ , ( $\theta < \theta_c$ )。电子在磁镜入口处角分布也是余弦分布:  $d\sigma/d\Omega_1 = (\sigma_0/\pi) (B_{\text{col}}/B_{\text{min}}) \cos \theta_c$ 。可以看出总的二次电子数降低了  $B_{\text{col}}/B_{\text{min}}$  倍, 由此得到磁镜的作用  $\alpha_{\text{col}} = (B_{\text{col}}/B_{\text{min}}) \sigma_0$ 。

### 2.3 静电透镜

反射电子的分布可以用实验测量<sup>[9]</sup>得到的  $\delta$  函数分布的弹性散射和均匀分布的非弹性散射电子能谱近似表示为  $d\alpha_{\text{col}}/dE = a/U_{\text{col}} + b\delta(dU_{\text{col}})$ , 其中,  $a$ ,  $b$  为物质系数,  $U_{\text{col}}$  为收集杯的电位。用简单的表达

式:  $(\alpha_{col})_E = k (U_{min}/U_{col})^2$ , 其中:  $U_{min}$  为位阱的电位,  $k$  为与收集杯材料和真空状况有关的参数。

考虑磁镜因素、静电透镜因素, 总的二次电子发射系数为

$$\alpha_{col} = k \left( \frac{U_{min}}{U_{col}} \right)^2 \frac{B_{col}}{B_{min}} \tag{3}$$

除此之外, 收集器区的真空状况、收集杯表面物质也会对收集效率有影响。

### 3 模拟计算

为了模拟计算收集器区域电子运动情况, 首先要获得该区域的磁场分布, 以及进入收集器入口处的电子束的初始参数, 然后计算初级束流到达收集杯底部时的束流位置、密度分布、入射角度等, 根据二次电子发射规律, 由此获得由收集杯表面发射的二次电子的初始参数, 如发射位置、初始能量、出射角及密度分布等。

首先用 EGUN 程序计算初级电子束在收集器中的运动, 调节电、磁参数, 使其能够完全进入收集杯底部; 其次跟踪慢电子; 第三跟踪快电子。计算结果表明, 初级电子能够全部进入收集杯, 由于磁镜作用慢电子全部被抑制, 只有部分快电子逃逸出收集器, 其流强与初始电子束流强之比就是相对电流损失。图 3 为两种磁场设置情况下, 初级电子和快电子混合计算的轨迹, 其中图 3(a) 为位阱处磁场  $B_{min}$  较高的情况, 图 3(b) 为磁场  $B_{min}$  较小的情况。

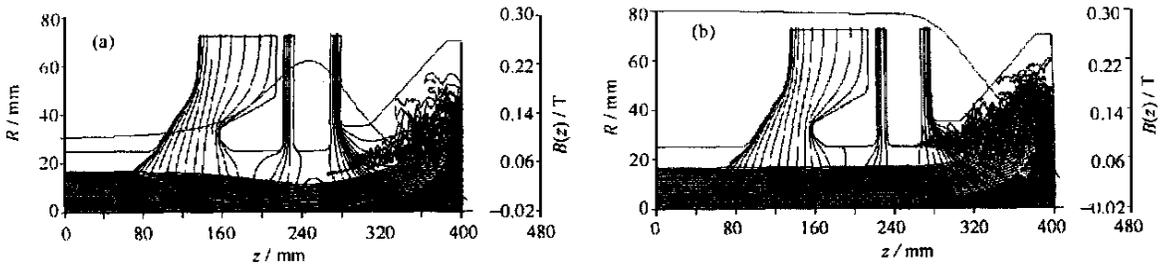


Fig 3 The trajectories of primary and secondary electrons in the collector  
(a) With a higher magnetic field  $B_{min}$ ; (b) With a lower magnetic field  $B_{min}$

图 3 收集器内初级和二次电子的轨迹

从计算结果可以得出,  $U_{min}$  是由各电极电位及初级、二次电子空间电荷效应共同决定的, 如果抑制极电位  $U_s$  太低, 虽能够完全阻止二次电子逃出收集器, 但也阻止了部分初级电子进入收集器。在高流强情况下, 空间电荷引起的位降很大, 只须降低  $U_s$  就可以达到最小的  $U_{min}$ 。在低流强情况下, 还须降低收集器阳极电位  $U_{anode}$  以及收集杯电位  $U_{col}$  电位来达到最小的  $U_{min}$ , 同时要降低最高磁场值, 否则初级电子的纵向能量将会完全转化为横向能量而返回。

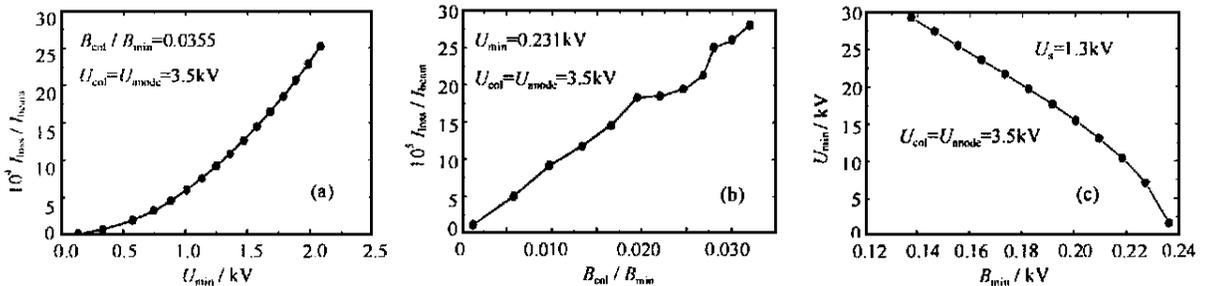


Fig 4 The result of different conditions

图 4 不同条件上的计算结果

在大半径区域, 磁镜的作用强于位阱, 而在小半径区域, 位阱作用强于磁镜。另一方面, 如果单独降低  $U_s$ , 则出现大半径 (即束流外层) 的初级电子被阻止的现象, 原因在于只降低  $U_s$ , 仅使该电极附近电位

降低而对于轴上电位影响并不大,所以抑制电极应有一定的厚度,施加到它上面的电压才能够改变轴上的电位,厚度与孔直径尺寸大致相同。

通过多次计算,对于给定电流值的情况下,找出最小的  $U_{min}$  使得初级电子全部进入收集器,然后调整磁场获得最小逃逸电流。图 4 给出了在不同条件下的模拟结果,可见,在势阱处的磁场强度越高,电子束半径越小,空间电荷引起的位降越大,该点的电位越小。

#### 4 结 论

通过选取合理的几何结构,根据工作电流调节参数  $U_{coil}$ 、 $U_{anode}$  及  $U_{scoil}$ 、 $B_{coil}$ 、 $B_{min}$  可以获得最高的收集效率,将逃逸电子降低到初级束流的  $10^{-4}$  以下,收集效率达到 99.99%。在考虑了初级电子的空间电荷效应的情况下,模拟结果与实验结果<sup>[8,9]</sup>符合得很好。

#### 参 考 文 献:

- [1] Meshkov IN. Physics and technique of Electron cooling: The first 30 years and thereafter[J]. Nucl Instr Meth phys Res, 1997, **A391**: 1.
- [2] Bossert J, et al. The new collector for the electron cooling device at LEAR[J]. Nucl Instr Meth phys Res, **A311**: 465~ 471.
- [3] Ellison T J P, et al. The UCF electron cooling system collector performance[J]. Nucl Instr Meth phys Res, 1989, **B40/41**: 868~ 869.
- [4] Gergely G. Elastic peak electron spectroscopy for auger electron spectroscopy and electron energy loss spectroscopy[J]. *Surface and Interface Analysis*, 1981, **3** (5): 201~ 205.
- [5] Shimizu R, Ichimura S. Direct Monte Carlo simulation of scattering processes of keV electrons in Aluminum; comparison of theoretical N(E) spectra with experiment[J]. *Surface Science*, 1983, **133**: 250~ 266.
- [6] Ding Z J, Shimizu R. Monte-Carlo study of backscattering and secondary electron generation[J]. *Surface Science*, 1988, **197**: 539~ 554.
- [7] 杰克逊 J D. 经典电动力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1983.
- [8] Sharapa A N. Efficiency of an electrostatic barrier in an electron beam energy recuperator[J]. Nucl Instr Meth phys Res, 1993, **A329**: 551~ 554.
- [9] Sharapa A N. Secondary electron current loss in electron cooling devices[J]. Nucl Instr Meth phys Res, 1994, **A351**: 295~ 299.

## COLLECTION OF ELECTRON BEAM

YANG Xiao-dong, SONG Ming-tao, XIA Jia-wen, WEI Bao-wen

*Institute of Modern Physics, the Chinese Academy of Sciences, P. O. Box 31, Lanzhou 730000 China*

**ABSTRACT** High efficiency collector is favorable for stable operation of electron cooling device and regulation of high voltage power supply. In this paper, the dependence of collector efficiency on the geometric, electrical and magnetic factors is investigated. The result shows that high efficiency can be obtained under appropriate parameter setup. The loss current with respect to primary beam current is less than  $1 \times 10^{-4}$ , the efficiency is higher than 99.99%.

**KEY WORDS:** collector; efficiency; electron beam