

静电减速透镜能量分析器的数值计算

胡玉民 李仪
(清华大学, 北京)

摘 要

用表面电荷密度法计算了能量分析器中静电减速透镜的电位分布, 用基尔法对电子轨迹进行了模拟, 在电子能量为20keV时, 得到分析器的能量分辨为1.0eV; 讨论了束径、入射角、透镜第三电极孔径对能量分辨的影响; 并对个别实验结论作了补充。

一、引 言

静电减速透镜能量分析器已被成功地应用到高频离子源和双等离子体源的能量分析中^[1,2], 它比静电分析器^[3]结构简单、使用方便。但文献[1]、[2]的作者仅从实验上解决了把这种分析器的原理变成实际上可行的一种能散测量方法。本文则以文献[2]中的减速透镜系统为例(见图1), 对该系统的能量分辨进行数值计算。先用表面电荷密度法^[4]编制

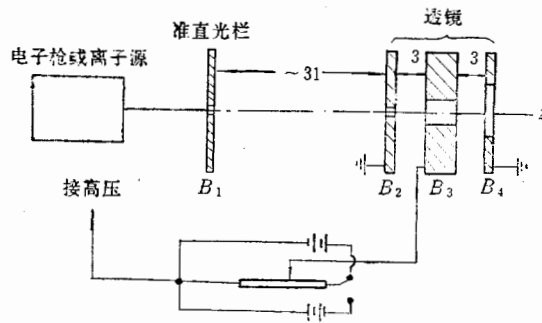


图1 静电减速透镜能量分析器原理图^[2]电极孔直径
(mm): B_1 : 0.15; B_2 : 0.10; B_3 : 2.0; B_4 : 4.0

的程序^[5]计算透镜中的电位分布; 而后用基尔法计算粒子轨迹, 得到减速截止曲线, 从而得到透镜系统的能量分辨; 另外对影响透镜系统能量分辨的束径、入射角、透镜第三电极孔径进行了计算和讨论。所得能量分辨的计算值与实验结果相当符合, 其他参数的讨论也与实验基本一致。

二、计算方法简述

减速透镜能量分析器是通过调节透镜中间电极抑制电位所得到的减速截止曲线来实现粒子能谱分析的^[2]。单透镜中心平面上的电位分布是马鞍形的,轴上电位最低,而入射粒子总有一定束径和发散角,因此在测量中透镜本身就会给粒子束带来附加能散,通常称之为分析器的能量分辨,以 R 表示。能量分析器测得的粒子束能散,实际上是粒子束的能散和分析器的能量分辨 R 之和,文献[1,2]中称之为外观能散。

通过轨迹计算,可以定量算出透镜的能量分辨 R 。为此,首先用根据表面电荷密度法原理编制的程序计算透镜中的电位分布,而后用基尔法编制的程序来求解描述电子轨迹的微分方程组。假定有一束总数为 50、能量均匀的电子,它们在半径 (0.05 mm) 方向按 10 等分均布,再在入射角内按 5 等分均布(由准直光栏限制的最大入射角约为 4mrad),忽略电子间相互作用,对不同的减速电压,计算这 50 条不同初始半径和入射角的电子轨迹,并统计出对应每个减速电压电子通过透镜的百分数,从而得到减速截止曲线。通常定义相应于总数 10% 和 90% 的粒子通过透镜时的减速电位差为透镜的能量分辨 R 。

三、计算结果及其与实验的比较

1. 透镜中电位的计算 利用文献[5]的 Optics1. EXE 程序可以计算空间任意一点的电位,此程序在计算一般场点时精度较高,但对电极表面以及靠近电极表面的那些点,由于在计算电荷密度时未能消除第一类奇点,误差较大。然而对图 1 这样的透镜系统,粒子的轨迹很难到达电极 B_3 表面附近,故即使此处电位计算误差很大,对粒子轨迹的计算也不会有什么影响。图 2 是设 B_3 电位为 -20.0440kV 时透镜中心平面上的电位分布。计算得到 B_3 表面的电位为 -20.0436kV (图 2),由此可得数值计算电极表面电位的相对误差为 2×10^{-5} 。由于 B_3 表面电位的计算误差大,可以推断透镜空间电位计算的相对误差小于 2×10^{-5} 。

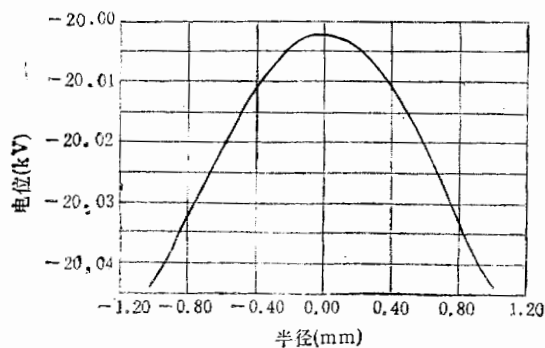


图 2 透镜中心平面上的电位分布

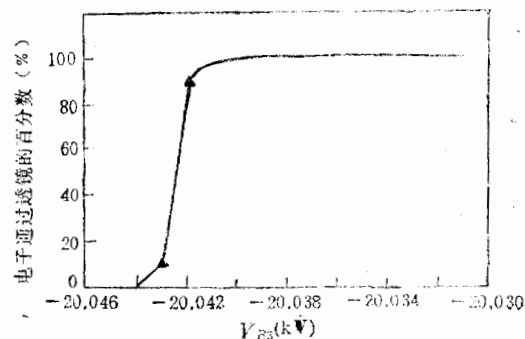


图 3 能量分析器的减速截止曲线

▲—电子总数 10%、90% 通过透镜时的相应值

2. 能量分辨 R 的计算 图3是对图1透镜系统计算得到的减速截止曲线, 计算中电子能量 $E = 20\text{keV}$, 由曲线得到系统的 $R = 1.0\text{eV}$. 文献[2]测得钨丝阴极发射电子的外观能散为 1.6eV , 扣除原子中电子热运动本身的能散 0.9eV ^[1], 透镜系统能量分辨的实验值应为 0.7eV . 考虑到电子热运动的能散只是一个尚无实验验证的理论值, 应该说透镜系统能量分辨 R 的理论计算值和实验结果是符合得相当好的.

图4是当入射半径 $r = 0.04\text{mm}$ 时, 电子从工作在反射镜附近的单透镜通过和返回的两条轨迹.

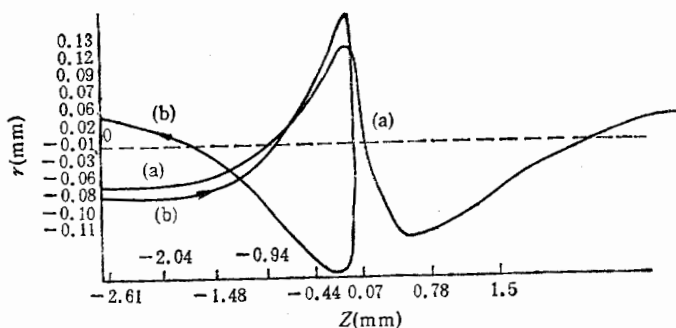


图4 从透镜通过 (a) 和返回 (b) 的两条电子轨迹

入射角: (a): 平行入射 (b): 0.18327rad

3. 入射角和束径对能量分辨 R 的影响 对图1的透镜系统, 计算得到在理想平行入射时的能量分辨为 0.7eV , 比在由 B_1 和 B_2 所限定的人射角内以任意角度入射时的能量分辨 1.0eV 小 0.3eV , 这说明在降低能量分辨时要注意粒子入射角的影响, 而入射角与准直光栏 B_1 有关, 所以在设计中必须把准直光栏和透镜作为一个整体来考虑.

图1系统中当 B_2 的孔径为 0.02mm 、 0.10mm 和 0.50mm 时, 能量分辨 R 的计算值分别为 0.8eV 、 1.0eV 和 5.7eV . 由此可见, 虽然束径对能量分辨的影响很大, 但当 B_2 孔径减小至 0.02mm 和 0.10mm 时能量分辨 R 相差不大, 而 B_2 孔径如像文献[1]中那样取 0.02mm , 带来加工和测量的困难比取 0.10mm 要大得多.

4. 透镜第三电极孔径对能量分辨 R 的影响 文献[2]中由实验确定 B_4 的孔径为 4.0mm , 而对 B_4 孔径 1.0mm 、 2.0mm 的数值计算表明, 粒子都能在透镜轴附近通过 B_4 , 能量分辨 R 同样可以达到 1.0eV . 实验与计算的差别是由于通过实验途径寻找 B_4 的最佳孔径是与解决透镜同心度对减速截止曲线的影响交叉进行的. 同心度不好, 电子容易碰到 B_4 上. 从计算结果看, 如能保证理想的同心度, 则 B_4 孔径就不是一个很严格的参数. 当然, 正如图4所示, 单透镜的工作状态接近反射镜时聚焦力特别强, 另外实际的透镜同心度不可能完全理想, 粒子有可能碰到 B_4 而损失掉. 所以 B_4 的孔径适当取大些, 如取 3mm 甚至 4mm 较为保险.

四、结 束 语

通过模拟计算, 验证了实验结果, 并对个别实验结论作了补充, 为设计静电减速透镜

能量分析器提供了更为完整的依据。计算表明, 表面电荷密度法对计算轴对称静电场是一个相当好的工具。应该指出, 实验所得透镜同心度要求好于 0.01mm 的结论^[2]本文未能讨论, 有待进一步分析。

作者感谢董雷在计算中提供的帮助和有益的讨论。

参 考 文 献

- [1] V. G. Först, *Z. Angew. Physik*, **10**(1958), 546.
- [2] 胡玉民等, 原子能科学技术, **13**, (1979), 61.
- [3] Masayuki Fukao et al., *Japan. J. of Appl. Phys.*, **14**(1975), 1017.
- [4] A Renau et al., *J. Phys. E: Sci. Instrum.*, **15**(1982), 347.
- [5] 李明阳等, 电子科学, **8**(1986), 470.

NUMERICAL CALCULATION FOR ELECTROSTATIC DECELERATING LENS ENERGY ANALYZER

HU YUMIN LI YI

(Tsinghua University, Beijing)

ABSTRACT

The potential distribution in the electrostatic decelerating lens is calculated with charge-density method. The Gill method is used to simulate the electron orbits. The resolution of the analyzer is 1.0 eV at 20 keV. The influence of the beam diameter, injection angle and the hole diameter of the third electrode to the resolution are discussed. Some additions to the experimental data are given by simulation.