

# 空间电荷透镜聚焦能力与 外电磁场的关系\*

郁庆长 邱 宏 黄佳昌

(中国科学院高能物理研究所, 北京 100039)

## 摘 要

在不同外电磁场情况下利用射频方法测定了自持空间电荷透镜中电子云的电子密度, 利用阻止场方法测定了由电离产生的离子能量分布, 从而确定了空间电荷透镜聚焦能力与外电磁场的关系。对 Лебедев-Морозов 公式的适用范围进行了讨论。

空间电荷透镜是一种新型的离子束聚焦透镜<sup>[1,2]</sup>。它利用磁约束电子云对离子束进行聚焦, 其聚焦性能决定于电子云的状态。以图 1 所示轴对称空间电荷透镜为例。假定透镜中电子云是均匀的, 云内的径向电场强度应为

$$E_r = -enr/2\epsilon_0, \tag{1}$$

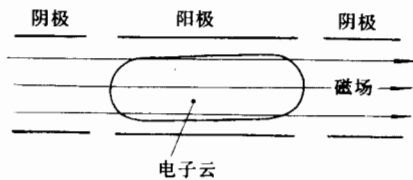


图 1 空间电荷透镜示意图

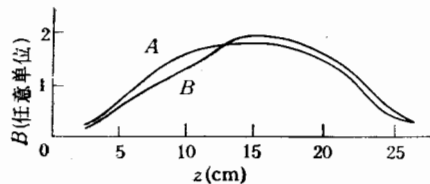
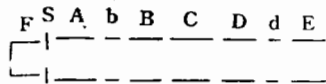


图 2 自持空间电荷透镜及透镜中磁场的轴向分布曲线

此处  $e$  为电子电荷的绝对值,  $n$  为电子密度,  $r$  为径向坐标,  $\epsilon_0$  为真空介电常数。一个与轴平行入射的离子通过电子云后获得的径向速度为

$$v_r = \frac{ZeE_rL}{Mv} = -\frac{Ze^2nrL}{2\epsilon_0Mv}, \tag{2}$$

此处  $Z$  与  $M$  为离子的电荷数与质量,  $v$  为离子速度,  $L$  为电子云长度。由此可求得透镜焦距

本文 1990 年 6 月 25 日收到。

\* 国家自然科学基金资助项目。

$$F = \frac{rv}{|v_r|} = \frac{2\epsilon_0 M v^2}{Ze^2 n L} = \frac{4\epsilon_0 U_B}{enL}, \quad (3)$$

$ZeU_B$  为离子的动能。

透镜的总电压  $V$  可分为两部分。我们称阳极与电子云中心间的电压  $V_T$  为横向电压，称电子云中心与阴极间的电压  $V_L$  为纵向电压。设电子云半径为  $a$ ，阳极内壁半径为  $R$ ，则

$$V_T = ena^2[1 + 2\ln(R/a)]/4\epsilon_0,$$

$$V_L = V - V_T. \quad (4)$$

显然  $V_T$  应小于  $V$ 。因此电子密度将受电压的限制：

$$n < \frac{4\epsilon_0 V}{ea^2[1 + 2\ln(R/a)]}$$

$$< \frac{4\epsilon_0 V}{ea^2}. \quad (5)$$

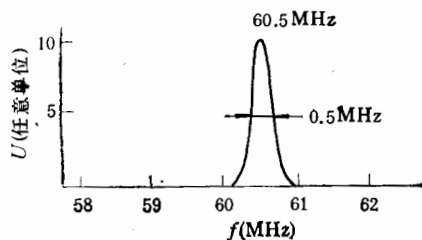


图3 电子云的第一振荡峰。总电压 2 kV，中心磁场 0.031 T，磁场分布 A

如果近似地认为  $a \approx R$ ， $V \approx V_T$ ，并令  $\theta = L/2a$ ，式 (3) 就简化为常用的 Лебедев-Морозов 公式<sup>[1-3]</sup>

$$F = aU_B/2\theta V. \quad (6)$$

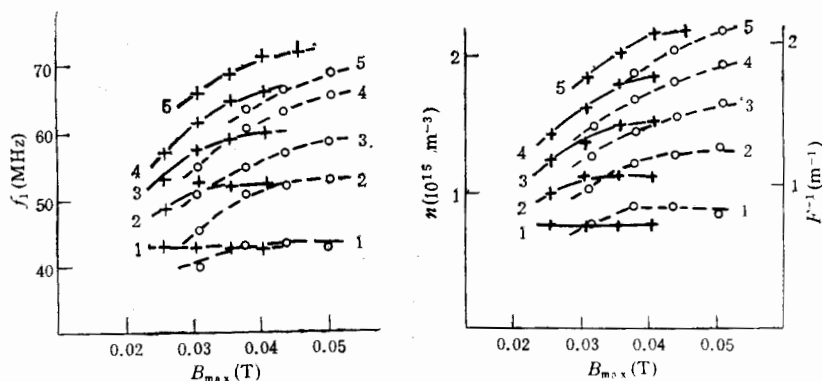


图4 自持空间电荷透镜电子云的第一振荡频率、电子密度和对于 0.5 MeV 离子的焦距  
总电压：1—0.8 kV，2—1.2 kV，3—1.6 kV，4—2.0 kV，5—2.4 kV。

实线——磁场分布 A，虚线——磁场分布 B

利用磁约束装置 MC1<sup>[4]</sup> 对空间电荷透镜中外电磁场与透镜聚焦性能的关系进行了研究。图 2 上方为实验中使用的自持空间电荷透镜，其中 A, E 为阴极，B, D 为接地的中间电极，C 为阳极，它们的内径为 3.2 cm。这些电极处于线圈产生的轴向磁场中，图 2 下方是实验中采用的两种轴向磁场分布。透镜总长 20 cm，真空度约为  $3 \times 10^{-4}$  Pa。在实验中阳极和中间电极之间的电压为总电压的 1/8。通电后透镜中发生冷阴极 Penning 放电产生电子云。电子与气体原子碰撞使电子向外扩散而损失，气体电离释放的电子补偿了这一损失使电子云保持稳定。当电压增加时电子温度增加，此时电离频率增加得比电子-原子碰撞频率快。根据近似理论，这导致电子密度的增加<sup>[5]</sup>。此外当磁场增加时电

子密度亦增加。

当  $ka < 1$  时电子云的等离子体波第一振荡频率为<sup>[6]</sup>

$$f_1 = f_p ka / j_0, \quad (7)$$

此处  $k$  为波数,  $f_p$  为等离子体频率,  $j_0$  为零阶 Bessel 函数  $J_0(x)$  的第一个根,

$$j_0 = 2.405, \\ f_p = \frac{e}{2\pi} \left( \frac{n}{m\epsilon_0} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (8)$$

$m$  为电子质量。由式 (7), (8) 可得

$$n = m\epsilon_0 \left( \frac{2\pi f_1 j_0}{eka} \right)^2. \quad (9)$$

将射频扫频信号从探测环 b 输入, 由探测环 d 接收信号并检波, 可以在示波器上观测到振荡峰 (图 3), 由此可确定  $f_1$ 。在实验中当电压升高时峰变宽。由于峰的宽度应随电子温度增加而增加, 这就表明电压较高时电子温度较高。

电子云长度  $L$  估计为 10 cm。由  $k = \pi/L$  可得  $k \approx 30 \text{ m}^{-1}$ 。

电子云的径向边缘近似地沿着穿过中间电极的磁力线中最靠近对称轴的一条磁力线, 由此估计出电子云的半径  $a \approx 1.3 \text{ cm}$ 。

图 4 画出了实验测定的不同外电磁场情况下电子云的第一振荡频率, 以及由此计算出的电子密度与对于 0.5 MeV 离子的焦距。

图 2 中的 Faraday 筒 F 和它的屏蔽 S 构成了一个简单的电阻止场离子能谱分析器。图 5 是与阴极相连的 Faraday 筒接受的离子流  $I_F$  与屏蔽和阴极间的电压  $V_s$  的关系曲线。在曲线 1

的情况下随着  $V_s$  的增加  $I_F$  逐渐减少, 此时 Faraday 筒接受的离子的能量分布是较均匀的。我们观测到此电子云的振荡峰, 计算出它的电子密度为  $2.1 \times 10^{15} \text{ m}^{-3}$ 。在曲线 2 的情况下  $I_F$  在  $V_s < 1.7 \text{ kV}$  区域变化很小, 这表明 Faraday 筒接受的离子能量大都高于 1.7 keV。此时看不到振荡峰, 可以认为它的电子云很小或不存在。

从上述实验结果可以得出下列结论:

1. 由图 4 可看出, 空间电荷透镜的电子密度和聚焦能力随电压的增加而增加。在较低电压下, 电子密度在较低磁场中就已饱和, 因此透镜的聚焦能力不随磁场变化。在较高电压下, 透镜的电子密度和聚焦能力随磁场的增加而增加, 但在磁场较高时也趋向饱和。这和前面所述理论是一致的。

2. 在电子密度接近饱和时 (如图 5 中曲线 1) 透镜的纵向电压较小, 电子云各处产生的离子到达 Faraday 筒时具有不同的能量, 因此离子能量分布较均匀。而在电子云很小

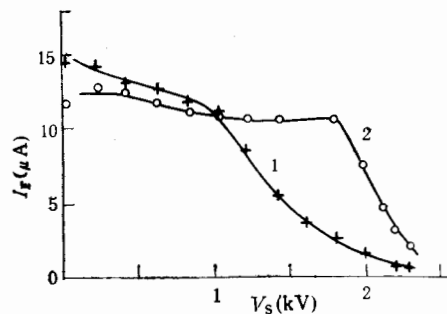


图 5 Faraday 筒接受的离子流与屏蔽电压的关系曲线。总电压 2.4 kV, 磁场分布 A, 最高磁场: 1—0.041 T, 2—0.026 T

或不存在时(如图5中曲线2)透镜的纵向电压  $V_L$  很大,多数离子经过这一电压的加速,到达 Faraday 筒时就具有高于  $eV_L$  的能量。这和图5的实验结果一致。

3. Лебедев-Морозов 公式适用的一个条件是  $V \approx V_T$ 。这就是说,在电子密度接近饱和时这一公式的误差较小。而在电压较高、磁场较低的情况下电子密度可能距饱和较远,此时使用 Лебедев-Морозов 公式可能带来较大误差。

本工作得到了周清一教授和王书鸿、陈鉴璞同志的关心,舒传玉、李继纲、梁笏鸣同志参加了部分工作,作者对他们致以衷心的感谢。

### 参 考 文 献

- [1] 郁庆长,强流离子光学原理,原子能出版社,北京,1982,297页。
- [2] R. Booth and H.W. Lefevre, *Nucl. Instr. Meth.*, **151** (1978), 143.
- [3] С. В. Лебедев и А. И. Морозов, *Ж. Тех. Физ.*, **36** (1966), 960.
- [4] 郁庆长,北京对撞机通讯,1990, no. 3, 5.
- [5] 郁庆长,第四次全国粒子加速器学术年会论文集,北京,1989,159页。
- [6] S. A. Prasad and T. M. O'Neil, *Phys. Fluids*, **26** (1983), 665.

## Relations Between Focusing Power of Space-Charge Lenses and External Electromagnetic Fields

YU QINGCHANG QIU HONG HUANG JIACHANG

(Institute of High Energy Physics, Academia Sinica, Beijing 100039)

### ABSTRACT

Under different external electromagnetic fields, the electron densities of the electron cloud in a self-sustaining space-charge lens are measured with the radio-frequency method and the energy distributions of the ions produced in ionization are measured with the stopping field method. From them the relations between the focusing power of space-charge lenses and the external electromagnetic fields are determined. The available region of the Lebedev-Morozov formula is discussed.