

空间电荷透镜聚焦特性的研究

邱宏 陈鉴璞 徐建铭

(中国科学院高能物理研究所)

摘 要

设计和实验了一台可用于会聚几十 keV 强流离子束的空间电荷透镜。实验结果可用简化的物理模型来解释。实验验证了空间电荷场的存在及其强聚焦特性。指出在这一实验条件下空间电荷场形成的弛豫时间比 $10 \mu\text{s}$ 小得多,因而可以用来会聚脉宽为几百 μs 量级或更长的脉冲束。

一、前 言

利用空间电荷的电场使束流聚焦的设想和初步实验(对电子束),在三、四十年代就有过^[1,2],但长期未得到发展。原因是它要比经典的电磁透镜复杂,而其优越性又未充分显露出来。

六十年代的苏联学者从等离子体物理的观点研究了这个问题。Морозов 指出这种透镜可以应用于强流离子束聚焦,而不破坏其气体自中和效应^[3]。这一点是很重要的。因为空间电荷得到补偿的强流束在普通的静电透镜场中是不能继续保持其中和效应的。Лебедев 和 Морозов 分析正离子束穿过一个带电的载流环电极时中和电子的重新分布,得出了它的聚焦特性,认为这是一种强聚焦透镜^[4]。这些基础性的研究表明了空间电荷透镜用于低能强流束的聚焦是很有潜力的。

七十年代末美国开展了这种透镜的应用性研究,初步结果表明空间电荷透镜虽然涉及的是复杂的束-等离子体物理,但其运行并不如预想的那样困难。1978年 Booth 和 Lefevre 报道了在 400 keV 强中子发生器的加速管出口处,用空间电荷透镜代替原用的磁四极透镜,使靶流从 17 mA 提高到 25 mA^[5]。1979年他们又报道了永磁式空间电荷透镜的实验以及用九环电极组成的空间电荷透镜使 1.2 MeV 质子束聚成 $\phi 0.2 \text{ mm}$ 的试验结果^[6]。Brookhaven 实验室也在这一年报道了五种不同形式空间电荷透镜的试验结果^[7]。从这些报道看来,虽然透镜场的形状并没有很临界的要求,一般说来也比较容易达到稳定运行,但不同型式的透镜所要求的工作条件以及呈现的实验现象却差别很大,这反映了物理机制并不完全清楚,也还未找到最优化的设计途径。实验工作也只限于聚焦能力的测定。

我们设计了一个用作离子源出口处初聚焦系统的空间电荷透镜,可对几十 keV 强流束聚焦。本文是对它聚焦特性的初步测试结果。

本文 1982 年 4 月 7 日收到。

二、聚焦原理

强流正离子束输运时,它使剩余气体分子电离,所产生的电子被吸引在束中使束的空间电荷中和,在束的区域内形成了束-等离子体. 这种所谓“气体自中和”的强流束能否在电场的作用下而保持其中和效应呢? 一般说是不可能的. 只有在磁场和电子漂移同时存在的条件下,低密度等离子体内才可以存在一个电场而没有大电流. 从等离子体物理可以知道,此时电场、磁场和电子漂移三者方向是互相垂直的.

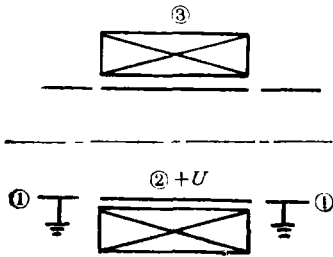


图 1

① 接地电极 ② 偏置电极 ③ 螺线管

典型的空间电荷透镜场的安排如图 1. 在没有空间电荷时电场和磁场显然不是完全正交的. 在透镜内填充产生空间电荷场的电子后(这种电子可以来自剩余气体分子电离或是从电极壁上打出来的次级电子),电子的分布使轴对称电场发生变化,沿磁力线方向的电场分量被抵消,最终形成正交电磁场. 这时磁力线即等位线.

假设螺线管产生的是一个理想的轴向均匀磁场(忽略端部的场变化),因而空间电荷产生的电场是纯径向的. 这个假设也相当于螺线管内均匀充满电子云. 它是一个线性聚焦场. 用薄透镜近似,透镜的焦距为^[5]

$$f = \frac{\phi R^2}{UL} \quad (1)$$

式中 ϕ 是正离子束的加速电压, U 是螺线管内偏置电极的电位, R 是它的半径, L 是螺线管及偏置电极的长度. 上式未考虑相对论修正.

静电四极透镜在薄透镜近似下,其聚焦平面内的焦距如果只取正弦级数展开的第一项,也具有上式形式. 但是四极透镜是有严重象散的光学元件,在总的聚焦效果上是不能和空间电荷透镜相比的.

上式内并未出现磁场. 磁场只是为了电子云在正交电磁场中作圆周的漂移而必需的,对离子束聚焦不是一个直接因素. 假设电子在半径 R (可能实现的上限)处作圆周漂移,在正交电磁场的作用下,漂移速度 v 为

$$v = \left(\frac{e}{2m} B \pm \sqrt{\frac{e^2 B^2}{4m^2} - \frac{2eU}{mR^2}} \right) R \quad (2)$$

为使 v 得到实数解,根号内的值不应为负值.

$$B \geq 2\sqrt{\frac{2m}{e} \frac{U^{\frac{1}{2}}}{R}} \quad (3)$$

一般文献中定义最小磁场为临界磁场,

$$B_c = 2\sqrt{\frac{2m}{e} \frac{U^{\frac{1}{2}}}{R}}.$$

由于电子实际上不是单纯的圆周运动,而是叠加在圆周上的旋轮线,因此通常取用的磁场比临界磁场要大. 本文所有公式都采用国际单位制(SI制)的单位.

三、实验结果

1. 透镜参数

设计的透镜准备用于强流中子发生器双等离子源出口,对 30—50keV 离子束进行会聚. 束流强度原则上没有限制.

透镜的结构如图 2. 图中 1 是螺线管,内径 4 cm, 长 6 cm, 匝数为 4800, 中心最大磁场为 520Gs. 2 和 3 都是偏置电极. 采用多电极的目的是为以后作象差研究时提供较灵活的实验安排. 目前的实验中都接在同一电压上,从 0 至 10 kV 可调. 4 是接地电极. 所有电极材料都是不锈钢. 电极和螺线管安装在直径为 435mm 一块底板上,作为一个整体元件插入. 电极可拆卸更换.

2. 实验条件

实验是在一个现成的离子源试验台上进行的,没有作大的改动,因此观察并不方便. 所用的离子源是一台氢双离子体脉冲离子源,引出能量最大为 50keV, 设计流强为 150—250mA. 实验时此源尚未调试好,所以总引出束流为几十 mA 时,用光阑割去边沿,进入透镜的束流为几 mA. 束流脉宽为 200 μs, 重复频率为每秒 10 次.

有束时真空约 2×10^{-5} mmHg.

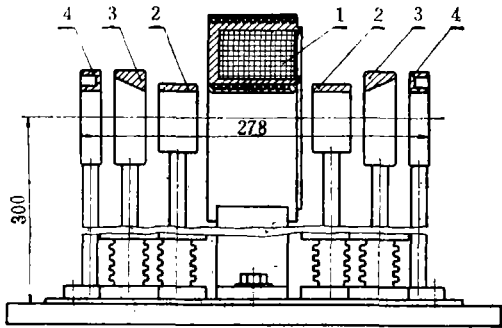


图 2

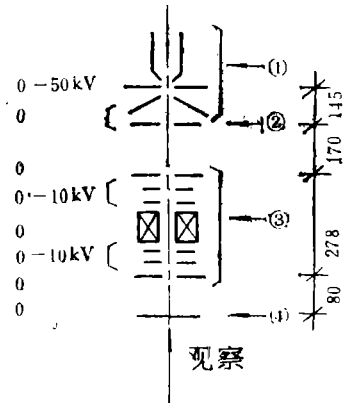


图 3

① 离子源 ② 光阑 ③ 透镜 ④ 荧光屏

系统示意图如图 3. 当离子源引出电压为 15—35kV 时,进入孔径为 11mm 光阑的束流为 13—30mA, 进入透镜的束流为 2.2—7.6 mA. 可见束是相当发散的. 在作成象实验时,此光阑改为 $4 \times 4 \text{ mm}^2$ 方孔光阑,进入透镜束流仍有 3—4 mA.

束流管道底部放一荧光屏,成象实验时调节透镜焦距使方孔光阑成象于荧光屏上. 测量束流时此处放一法拉第筒(加抑制电压 -225 V).

3. 实验结果和讨论

(1) 空间电荷场对聚焦作用的验证

由于空间电荷透镜是用一个电磁场来维持空间电荷存在,主要通过空间电荷的作用力使束流聚焦的。但电磁场本身原也是个会聚透镜,所以首先要鉴别实际聚焦效果中电磁场是否有贡献?我们做了两个实验:①不加偏置电压,磁场从0至550Gs变化;②磁场为0,偏置电压从0至8kV变化。在两种情况下荧光屏上只有极其微弱的均布光斑。而在有磁场同时又有电场的情况下荧光屏上出现明亮的光斑。图4是法拉第筒测得的束流,在示波器上看到的束流波形。同样表明透镜作用主要是空间电荷场产生的。其实,这个电磁场分析起来,不过是螺线管和静电单透镜的组合。从计算可知,图4(a)螺线管的焦距 $f \approx 25\text{M}$,对离子束实际上是没有作用的。而单透镜的电压比 $N = \frac{25}{23} \approx 1$,同样也没有透镜作用。图4(b)在空间电荷透镜作用下,实验所得焦距 $f = 12.9\text{cm}$ 。这样强的聚焦能力显然不可能来自上述电磁场的作用。

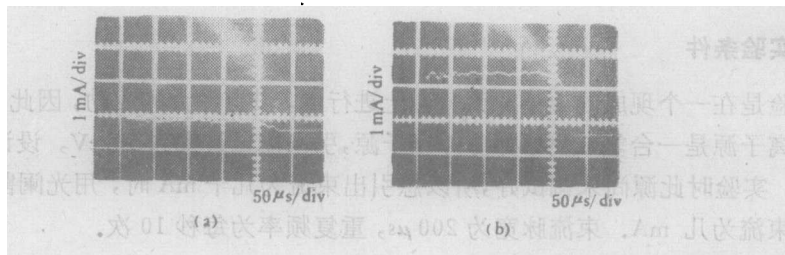


图 4

(a) $\phi = 25\text{kV}$, $B = 330\text{Gs}$, $U = 0$ (b) $\phi = 25\text{kV}$, $B = 330\text{Gs}$, $U = 2\text{kV}$

(2) 空间电荷透镜的焦距

实验中固定螺线管磁场为330Gs,在不同的束流能量 ϕ 下,改变偏置电压 U ,使 $3 \times 3\text{mm}^2$ 方孔光阑成像于荧光屏上,得到图5的结果。其线性关系还是相当好的,这和

(1)式中 ϕ 与 U 成正比是一致的。

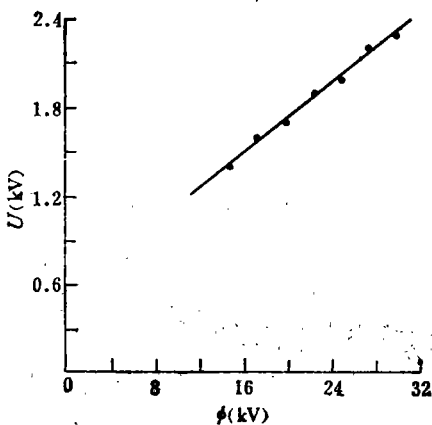


图 5

按薄透镜近似,图5的透镜参数下,根据物距和象距的实验安排,计算出焦距 $f = 12.9\text{cm}$ 。如果用(1)式计算理论上的焦距 f_t ,则 $f \approx (1.5-2.0)f_t$ 。这个差异并不奇怪,因为导出(1)式所作的一系列假设条件和目前设计的具体透镜结构是有明显不同的。例如,偏置电极实际上是在螺线管磁场之外,并不如图1那样在磁场之内,因而(1)式中 L 如何定义便是一个问题。计算 f_t 时取 L 为螺线管长度,这并不符合(1)式的假设条件。

(3) 临界磁场和实际必需的磁场值

实验中观察到磁场值在透镜聚焦中虽不十分临界,但在一定偏置电压 U 下实验清楚显示必须大于某一磁场值透镜才能工作。图6是在不同偏置电压下法拉第筒测得的束流

I 与磁场电流 I_M 的关系. 从荧光屏上看到, I_M 从 0.5—2.5 A (110—550 Gs) 变化时都有明亮的束斑. 在 0.5 A 以下, 束斑明显变暗. 到 0.2 A 亮斑完全消失. 这和图 6 中束流变化是一致的.

磁场电流 I_M 增大, 偏置电极上电流 I_e 就减小. (I_e 是平均值, 用磁电式微安表测量), 直到最后趋于一稳定值, 如图 7 所示. 取 $I_e = 10 \mu\text{A}$ 为稳定值, 此时的磁场值约为临界磁场的 2.7 倍. 这是很容易理解的, 因为按临界磁场导出的含意, 是指偏置电极内边沿处的场强, 而实验中根据磁场电流计算出来的是螺线管中心磁场. 按目前的电极安排, 后者

显然比前者高得多. 从实验所得到的临界磁场值与 $U^{\frac{1}{2}}$ 也有正比关系.

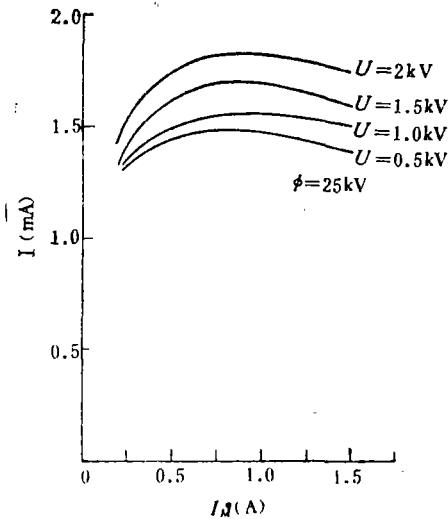


图 6

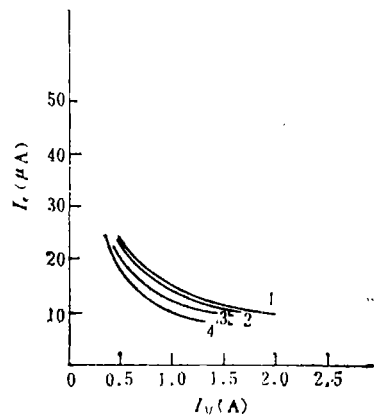


图 7

设计时一般可按 $B = k B_c$ 取, k 值在我们的电极安排下可取 2, 如果偏置电极放在螺线管内, k 值将更接近于 1.

(4) 空间电荷场形成的弛豫时间估计

在没有束流通过时偏置电极上的电流为 0, 当束流通过时偏置电流的波形与束的波形是一致的. 因此, 可以认为在真空 $(1.5-2.4) \times 10^{-5} \text{ mm Hg}$ 的实验条件下空间电荷场是由束电离剩余气体分子以及电极表面二次电子发射等机制产生的电子云所构成. 经过透镜聚焦后脉冲束的前沿上升时间(图 4(b)) 仍为 $10 \mu\text{s}$. 这与直接从离子源发出的束波形相似. 因而可以推断, 在目前的实验条件下, 空间电荷场形成所需弛豫时间较 $10 \mu\text{s}$ 要小得多, 从而这类透镜完全可用于目前的脉冲束(上升前沿 $10 \mu\text{s}$, 脉宽 $200 \mu\text{s}$).

四、结 论

空间电荷透镜是一种强聚焦透镜. 对于轴对称系统来说, 比传统的四极透镜组合更具有优点. 使用和运行并不复杂.

但这类透镜的研究和应用还比较初步. 虽然简化的物理图象可以说明一些现象, 但

是并不足以用来解释在不同的使用条件下不同结构的透镜所呈现的各种问题。物理机制的研究仍需深入。

透镜是有象差的, 实验中我们已看到了这一点。但通过多电极不同的配置理应可以减小象差, 这是下一个重要课题。

作者感谢郁庆长同志在透镜设计过程中有益的讨论; 竺仁全、吴日光同志为实验工作提供方便并大力协助; 以及先锋电机厂王光华、周金华等同志在透镜制造过程中给以很多帮助。特别感谢蒋佐法同志对这一研究工作的大力支持。

朱孚泉同志以及北京大学陈佳洱同志都对这一工作表示关心和支持, 也一并致谢。

参 考 文 献

- [1] B. von Borries, E. Ruska, *Z. Physik*, **76**(1932), 649.
- [2] D. Gabor, *Nature*, **160**(1947), 89.
- [3] A. И. Морозов, *Док. Акад Наук СССР.*, **163**(1965), 1963.
- [4] С. В. Лебелев, А. И. Морозов, *Ж. Т. Ф.*, **36**(1966), 960.
- [5] R. Booth, H. W. Lefevre, *N. I. M.*, **151**(1978), 143.
- [6] H. W. Lefevre, R. Booth, *IEEE. Trans.*, **NS26**(1979), 3115.
- [7] R. M. Mobley, G. Gammel, A. W. Maschke, *IEEE. Trans.*, **NS26**(1979), 3112.

STUDIES OF THE FOCUSING PROPERTIES OF A SPACE CHARGE LENS

QIU HONG CHEN JIAN-PU XU JIAN-MING

(*Institute of High Energy Physics, Academia Sinica*)

ABSTRACT

A space charge lens has been designed and tested which can be used to focus intense ion beams at several tens of keV. The experimental results obtained can be interpreted with a simplified physical model. The existence of a space charge field and its strong focusing properties are tested experimentally. And it is shown that the relaxation time for the formation of space charge field is much less than 10 μ s under our experimental conditions, thus the lens can be used to focus pulsed beams with length of several hundreds of μ s or longer.