

杆型 SFRFQ 结构的研究*

颜学庆† 方家驹 陈佳洱

(北京大学重离子物理研究所 北京 100871)

(2001 年 12 月 6 日收到 2002 年 1 月 2 日收到修改稿)

RFQ 加速结构是一种非常巧妙的低能强流加速结构,但是它存在能量上限问题.而杆型 SFRFQ 加速结构是一种改进的无反场的 SFRFQ 结构.对分离作用杆型 RFQ 加速结构在能量增益和横向稳定性两个方面进行了研究,最后还和光阑型 SFRFQ 结构进行了一些简单的比较.

关键词:能量上限问题,RFQ,杆型 SFRFQ,反场,光阑型 SFRFQ

PACC:0150P,2915D,2921

1. 引 言

RFQ(高频四极场)加速器是国际上 20 世纪 80 年代以来加速器发展的热点之一.它具有体积小、使用方便、流强和传输效率高特点,是一种非常巧妙的低能强流加速结构,使得离子在获得横向聚焦的同时,在纵向可以连续地得到加速^[1].然而在离子能量达到几个 MeV/核子后,随着离子能量的增加,每个加速单元的长度不断增加,从而使得该结构的比路阻抗急剧减少^[2],从而存在着能量上限的问题.本文将讨论一种改进的 RFQ 结构——杆型 Separated Function RFQ(SFRFQ)^[3],使得 RFQ 结构可以用于加速离子到更高能量.

杆型 SFRFQ 的结构见图 1(a),其中心部位的立体结构图见图 1(b).电极组 I 为两根长杆电极,它们的电位相同(图中以环 B、D 相联);电极组 II 则由一串长约 $\beta\lambda/2$ 的电极对单元组成,图 1(b)中画出了相邻的 4 个单元(1 2 3 4),相邻单元间有加速间隙 g .现以图中电极对单元 3 为例,它的 2 根电极电位相同(图中以环 C 相联),它们相对于电极组 I 的电压相位差为 π ,因而电极对单元 3 与电极组 I 在径向产生射频四极聚焦电场;由于电极对单元 2、4 均与电极组 I 电位相同(图中以环 B、D 相联),因而电极对单元 3 也与它们的电位相位相差 π ,所以

在间隙 g 内和轴线上均有纵向射频加速电场,它将对相位合适的在轴线附近运动的离子产生连续的加速作用.这些离子在电极组各单元间隙区的轴线附近得到连续的加速作用;它们在 1、3...等单元区受到横向聚焦作用,而在 2、4...等单元区则仅作漂浮运动,适当的参数选取可使其横向运动具有足够的稳定性.

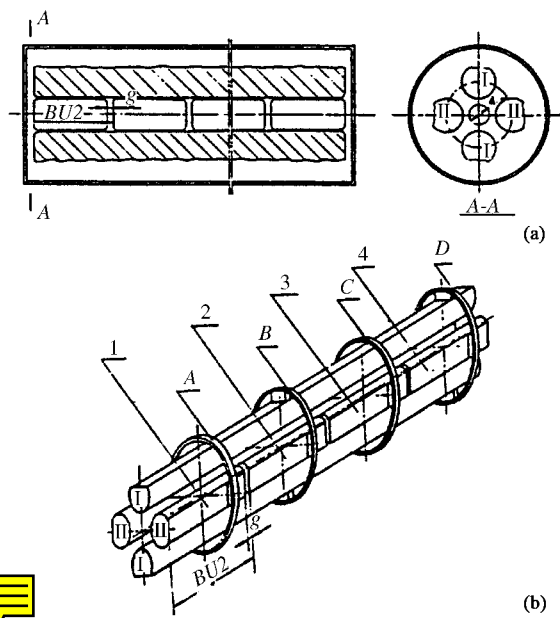


图 1 分离作用杆型 RFQ
(a)杆型 SFRFQ 加速结构 (b)中心部位立体结构图

* 国家自然科学基金(批准号:19975004)及高校博士点基金资助的课题.

† 电话:82751881(office)82763583(home).

2. 结构优化

对于图 1 所示的杆型 SFRFQ ,为了获得尽可能高的能量增益 其结构参数需优化选取. 本文在固定单元长度 $\beta\lambda/\lambda$ (45mm) ,极间电压为 V (75kV) 和频率为 f (26MHz) 的条件下对分离作用杆型 SFRFQ 结构进行大量计算 ,以期从中寻找出一种横向有较强聚焦力而纵向有很好的能量增益的 SFRFQ 加速结构.

显然改变电极杆的半径与孔径的比值 ρ 和间断电极间的距离 d 都可以改变加速电场. 离子的最佳能量增益和 d 的关系如图 2. 间断电极间的距离 d 增大时离子的渡越时间因子减小 ,因而离子的能量增益随着 d 的增大而减小.

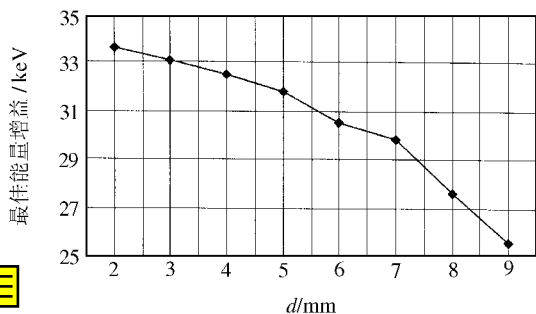


图 2 离子的最佳能量增益和 d 的关系

离子的最佳能量增益和 ρ 的关系如图 3 所示. 可以看到 ,离子的最佳能量增益随着 ρ 的增大而减小. 要获得比较高的能量增益 , ρ 应该取一个比较小的值.

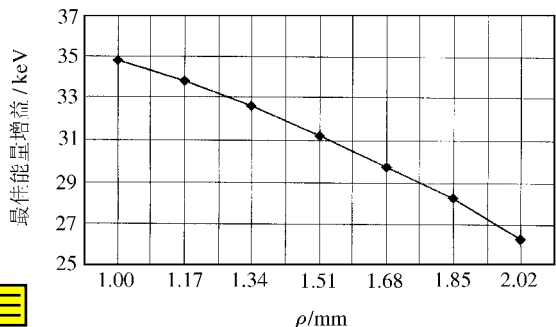


图 3 离子的最佳能量增益和 ρ 的关系

3. 横向运动的模拟

为了了解离子在该结构中的横向运动稳定性 ,有必要模拟出离子束在加速单元中的运动包络. 图 4 给出了粒子在第一个单元开始时的 y 方向的相图和离子在几个加速单元中的运动包络. 可以看出粒

子在该结构中的横向运动是稳定的.

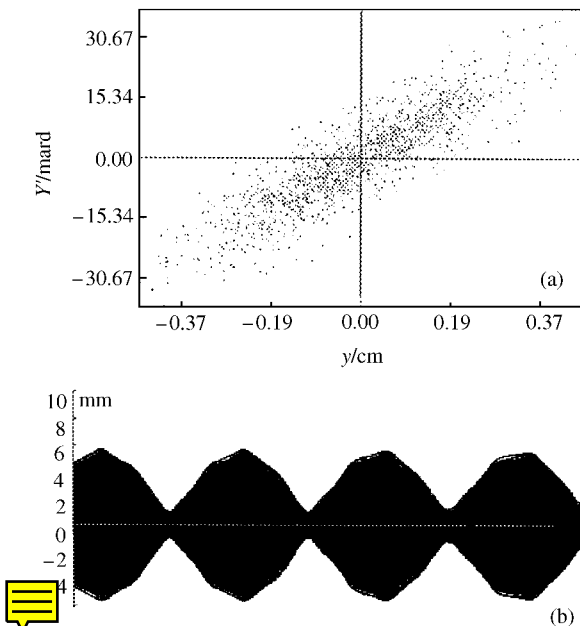


图 4 粒子相图和运动包络

(a) 给出了粒子在第一个单元开始时的 y 方向相图 (b) 运动包络

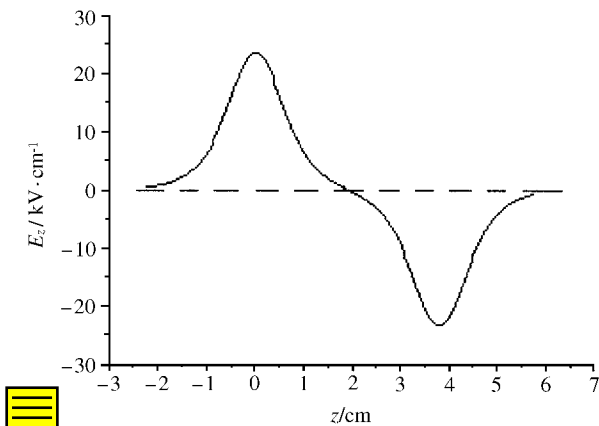


图 5 杆型 SFRFQ 结构轴上电场分布

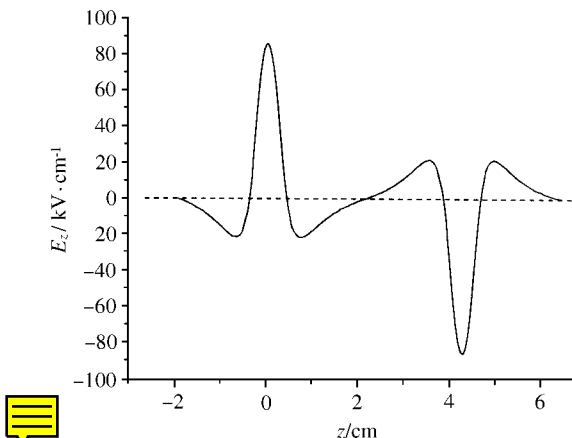


图 6 光阑型 SFRFQ 结构轴上电场分布

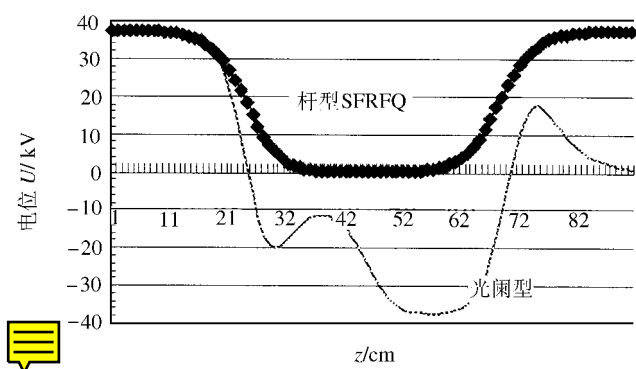


图 7 两种结构的轴上电位分布

4. 杆型 SFRFQ 的特点

用 RELAX3D 程序计算得到的电极对单元 3 附近轴上电场幅值分布见图 5. 和光阑型 SFRFQ 结构(图 6 是光阑型 SFRFQ 结构两个单元的轴上电场分布图)相比,可以发现这种类型的 SFRFQ 结构的最

大特点就是它的加速峰场两旁没有小的反向电场. 这是因为在光阑型 SFRFQ 结构中膜片是引入反向电场的根源,而在杆型 SFRFQ 结构中并没有引入膜片.因而和光阑型 SFRFQ 结构相比杆型 SFRFQ 结构中不存在反场问题^[4].

虽然在杆型 SFRFQ 结构中不存在反场问题,但是离子在这种结构中的能量增益中的最佳能量增益大约在 35keV 左右,这个虽然要好于普通 RFQ 结构的能量增益,但是要远远小于在光阑型 SFRFQ 结构中的能量增益^[5]. 这可以从图 7 所示的电位分布图中找到原因. 在单元长度为 $\beta\lambda/2$ (45mm), 极间电压为 V (75kV) 时,杆型 SFRFQ 结构中离子穿越间断电极间的间隙时相当于渡越一个电位差为 37.5kV 的电压,从而即使不考虑渡越时间因子单位电荷离子所可能得到的能量增益最大为 37.5kV. 而在光阑型 SFRFQ 结构中间隙间的电位差在 57.5kV 左右,远大于前者.

- [1] Kapchinsky I and Teplyakov V A 1970 *Prib. Tekh. Eksp.* 2 19
 [2] Swenson D A 1996 Proc. of 1996 Linac Conf 411
 [3] Chen J E, Fang J X, Wu Y and Li W G 2001 *Progress on Natural Science* 11(in Chinese) 陈佳洱、方家驯、吴 瑜、李纬国 2002 自然科学进展 11]

- [4] Wu Y 1999 Dissertation of Peking University(in Chinese) 吴 瑜 1999 博士学位论文(北京大学)
 [5] Yan X Q, Fang J X, Wu Y and Chen J E 2001 *Chinese Science Abstracts* 7 144(in Chinese) 颜学庆、方家驯、吴 瑜、陈佳洱 2001 中国学术期刊文摘(科技快报) 7 1441]

Study of the rod style SFRFQ structure *

Yan Xue-Qing Fang Jia-Xun Chen Jia-Er

(Institute of Heavy Ion Physics, Peking University, Beijing 100871, China)

(Received 6 December 2001; revised manuscript received 2 January 2002)

Abstract

There is a problem about upper limit of energy in the RFQ structure, although it is a wonderful low-energy-suited high current accelerating structure. After proposing an improved rod style SFRFQ structure without reversed field, the article studies its energy gain and transverse motion. The rod style SFRFQ structure is roughly compared with diaphragm SFRFQ structure.

Keywords: upper limit of energy, RFQ, rod style SFRFQ, reversed field, diaphragm SFRFQ

PACC: 0150P, 2915D, 2921

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 19975004), and the