

分离作用 RFQ 膜片电极的优化设计^{*}

王 智[†] 陈佳洱 颜学庆 陆元荣 郭之虞 方家驯 朱 昆

(北京大学重离子物理研究所,北京 100871)

(2005 年 12 月 16 日收到,2006 年 2 月 8 日收到修改稿)

用 RELAX3D 模拟分离作用射频四极场(SFRFQ)加速结构中傍轴下的电场分布,并分析了膜片孔径、加速间隙等参数对粒子能量增益的影响,找到了设计 SFRFQ 电极的一般方法,使得在极间电压为 70kV 的情况下(以 O^+ 为例)粒子通过一个周期单元,可获得 100keV 以上的能量增益,小球微扰法的测量值与模拟结果能很好的符合.

关键词:分离作用射频四极场,RELAX3D,能量增益,反场

PACC:0150P,2915D,2921

1. 引 言

分离作用射频四极场(SFRFQ)是上世纪 90 年代提出的一种新型加速结构^[1],该结构适于加速能量不太高的离子($\beta = v/c = 0.01-0.1$),可以接在传统的 RFQ 之后,将离子加速到几个 MeV/u 的能量^[2].分离作用光阑型 RFQ 就是在不加调制的射频四极场电极上,周期性地加载带孔的膜片,直接把横向电场转化为纵向加速电场,见图 1.

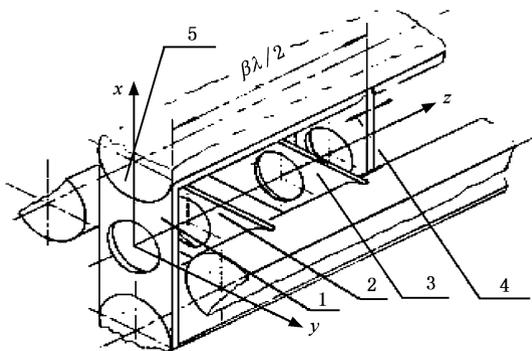


图 1 光阑型 SFRFQ 中心部位立体结构图(1,2,3,4 为加速光阑膜片电极对,5 为四杆电极)

该结构由于四极杆和膜片电极之间存在反向的电场,对离子的能量增益不利.反向场实际上是膜片与四杆电极之间的电位差造成的,如果改变膜片或四杆电极的几何参数,就能够改变空间的电场分布,

也就有可能增强膜片间的加速电场或减弱膜片两端的反向电场,同时要保证离子在横向运动的稳定性,不对称 $\beta\lambda/4$ 膜片结构的提出,很好地解决了这个矛盾^[3].但要达到实际应用的要求,还需要对诸如极间电压、膜片厚度、膜片孔径、加速间隙等进行比较细致的优化,以获得较高的电压利用率、机械强度并且提高打火的阈值,为以后的高功率实验以及加速离子做好准备.

2. 优化膜片参数

为了验证这种新型加速结构,设计了一个五个单元的 SFRFQ 电极,把它接在北京大学 26MHz, 1MeV RFQ 后面,将 O^+ 加速到 1.5MeV 的能量.图 2 画出了一个单元内的膜片排布示意图(四极杆未画出),其中, $L = \beta\lambda$, g_1, g_2, g_3, g_4 分别为四个膜片的厚度, g 为加速间隙宽度.首先用 RELAX3D 计算程序计算一个单元的情况,考察膜片孔径、厚度以及加速间隙的变化对粒子能量增益的影响,以期找到一个合适的比例,在不影响横向聚焦的前提下,获得尽可能高的能量增益.后面的加速单元亦可照此进行设计,只不过考虑到粒子能量的增加,每个单元的长度略有增加,这后面每个单元多出来的一些长度,可以考虑适当增加膜片的厚度,以降低反场的减速作用,获得更高的能量增益.

由 PARMTEQ 计算的结果可以知道,北京大学

^{*} 国家自然科学基金(批准号:30455001)资助的课题.

[†] E-mail: wangzhi@pku.edu.cn

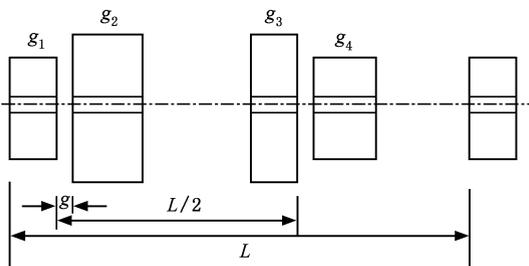


图2 一个单元内膜片排布示意图

26MHz 300keV N^+ RFQ 加速器加速段的每一个加速单元的能量增益约为 $20\text{keV}^{[4]}$ 。考虑到 RFQ 加速器的渡越时间因子 $T = \pi/4$ ，如果加速段同步相位为 -40° ，则每一个加速单元的电位差约为 33kV 。SFRFQ 中，假定间隙加速电场分布于长度为 L_g 的区间之内（ L_g 与加速电极的孔径 r 和加速间隙 g 有关）则越隙因子 T 为

$$T = \cos(\pi\xi/2)(1 - \xi^2), \quad (1)$$

其中 $\xi = L_g/L_s$ ， L_s 是加速单元的长度， $L_s = \beta_s \lambda/2$ ，此处 β_s 是同步离子的相对论速度因子^[1]。由(1)式可以看出，如果 L_g 足够小，则可以保证 $1 \geq T \geq \pi/4$ ，此时，如果能获得 45kV （或更高）的有效加速电压，可以使粒子得到比常规 RFQ 更高的能量增益。

保持孔径和加速间隙不变的前提下（ $g = 8\text{mm}$ ， $r_0 = 5\text{mm}$ ）经过不断优化电极膜片的厚度，得到了一个单元内轴向电场分布图和粒子能量增益的曲线，如图3和图4所示。

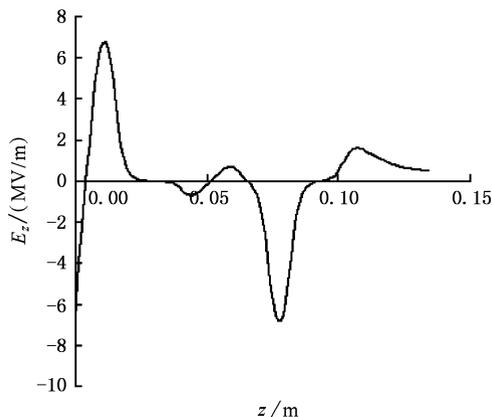


图3 一个周期单元轴上的电场分布

所用的膜片厚度分别为 $g_1 = 10\text{mm}$ ， $g_2 = 27\text{mm}$ ， $g_3 = 14\text{mm}$ ， $g_4 = 22\text{mm}$ 。由图4可以看出，粒子在一个周期单元的能量增益确实可以达到 100keV 以上，

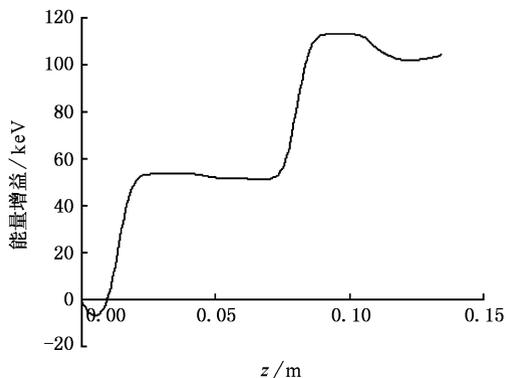


图4 一个周期单元离子的能量增益

因此，用五个这样的周期单元便可以保证在出口处粒子能量达到 1.5MeV 。

在找到一个可以保证使粒子经过一个周期单元获得 100keV 能量增益的情况下，改变膜片孔径和加速间隙，考察它们的变化对能量增益的影响。

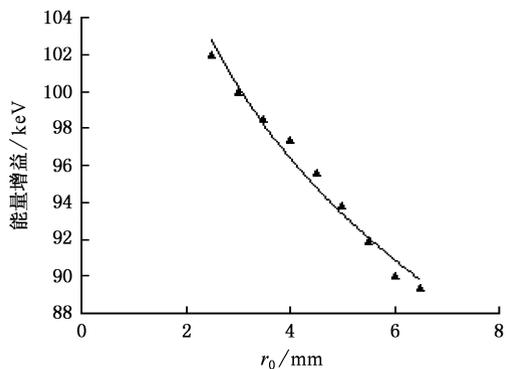


图5 能量增益随孔径的变化曲线

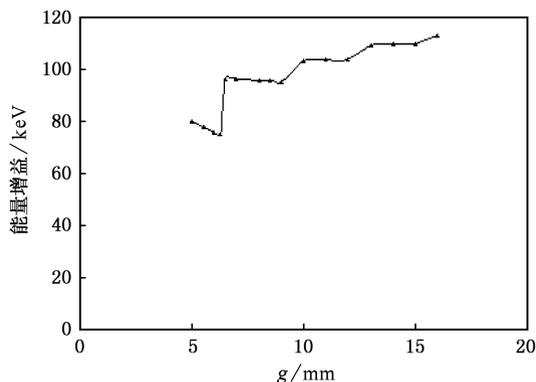


图6 能量增益随间隙的变化曲线

图5是在 $g = 8\text{mm}$ 时能量增益随孔径变化的曲线图，图6是在 $r_0 = 4.5\text{mm}$ 时能量增益随加速间隙

变化的曲线图.由图 6 可以看出,取加速间隙 $g = 8\text{mm}$ 是比较合适的,又考虑到实际加工的需要以及机械强度的因素,取 $r_0 = 4.5\text{mm}$.此时 $r_0/g = 0.56$, r_0/g 的值一般取得越小,对粒子能量增益越有利^[5].

后面的结构单元的孔径和间隙都保持不变,通过 RELAX3D 模拟的数据表明,反场对粒子能量增益的影响主要是在粒子出加速间隙的那块膜片上,所以可以考虑逐渐增加偶数块膜片的厚度,以尽可能地屏蔽反场的作用,而奇数块膜片的厚度对粒子能量增益的影响不大.这种规律可以作为以后设计膜片电极的参考,最后优化得到的膜片尺寸见表 1.

表 1 膜片电极中各个加速单元的几何参数

	g_1/mm	g_2/mm	g_3/mm	g_4/mm	L/mm
1	10	27	14	22	133.1
2	10	30	14	24	140.6
3	10	33	14	26	145.9
4	10	35	14	28	152.8
5	10	36	14	30	157.6

为了验证模拟计算的结果,我们按此尺寸建造了一个用于打火实验的电极,装在北京大学 300keV RFQ 谐振腔上,用小球微扰法测得的实际电场分布情况和模拟计算的结果见图 7(虚线表示实际测量的场),间隙间的加速电场能很好的重合,反场部分出现的微小偏差主要是由于加工和安装的公差以及测量系统的误差造成的.图 8 是离子出口处的能量增益,从图中可以看出已经超过 0.5MeV,达到预期的设计要求.

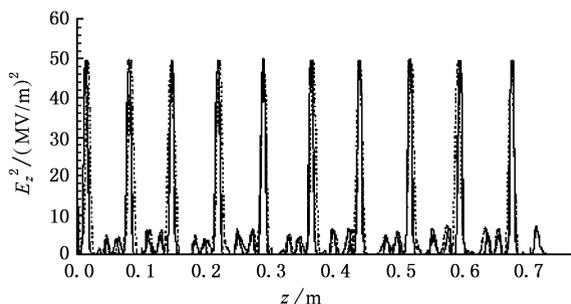


图 7 5 个单元内轴线上的电场分布情况

以上考虑的只是轴线上的同步离子的能量增益,以两个周期单元为例进行更细致的偏离轴线 ($r_0 < 5\text{mm}$) 的电场计算,其能量增益见表 2.

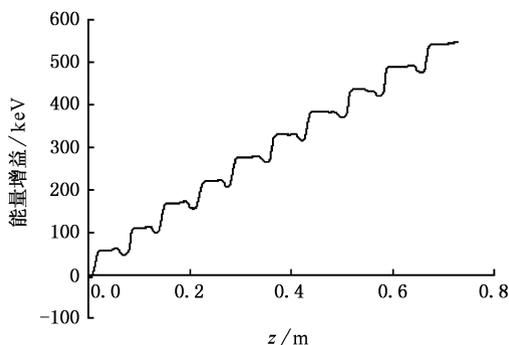


图 8 5 个单元后离子的能量增益

表 2 偏离轴线的能量增益

偏移距离/mm	0	1	2	3	3.5
能量增益/keV	247	248	250	253	256

由表 2 可以看出,能量增益与偏离轴线的位置基本呈线性关系,这主要是因为离轴线越远,反场的作用越不明显,即对离子的能量增益影响也就越小.

3. 公差分析

这里主要考虑与时间无关的误差,即结构本身的误差所造成的影响.在计算膜片的尺寸过程中,精确地计算离子在每个单元末端的相对速度 β 是很重要的,因为上个单元的 β 就作为下一个单元计算的起点,误差将有积累作用,误差过大会导致粒子的丢失,造成束流的不稳定.粒子的能量增益与离子的瞬时速度有关.做近似计算,离子在一个单元内的速度变化很小,可得一个加速单元内离子的能量增益为 $ZeV\cos(kz + \varphi_s)$,代入到模拟计算导出的数据中,可以得到一个单元的能量增益.然后以这个为起点,再计算下一个单元的长度,如此进行下去,直到得到所要加速离子的输出能量.由于我们加速的是重离子 (O^+, N^+ 等),在两个单元之间 β 的改变不是很明显,以 O^+ 为例,入口到出口 β 变化不超过 0.3%.

4. 结 论

通过考察一个周期单元内膜片参数的变化对轴线上电场分布的影响,找到了优化膜片电极的一些方法,即在保证横向运动稳定性的同时获得足够高的能量增益,可通过适当加厚偶数块膜片厚度以屏蔽反向电场的作用,而膜片孔径和加速间隙的比值

亦保持在合适的范围内. 实际测量的轴线上纵向电场分布, 与理论计算值能很好的重合, 这为以后

SFRFQ 膜片的设计提供了有用的参考.

- [1] Chen J E , Fang J X , Wu Y , Li W G 2002 *Progress on Natural Science* **12** 23(in Chinese)[陈佳洱、方家驹、吴 瑜、李纬国 2002 自然科学进展 **12** 23]
- [2] Yan Xue-Qing , Fang Jia-Xun , Chen J E 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 1153 (in Chinese)[颜学庆、方家驹、陈佳洱 2002 物理学报 **51** 1153]

- [3] Yan X Q 2004 *Dissertation* (Peking University)(in Chinese)[颜学庆 2004 博士学位论文(北京大学)]
- [4] Lu Y R , Chen C E , Fang J X 2003 *NIM A* **515** 396
- [5] Wu Y 1999 *Dissertation* (Peking University)(in Chinese)[吴 瑜 1999 博士学位论文(北京大学)]

Optimization of SFRFQ flake-electrode design *

Wang Zhi[†] Chen Jia-Er Yan Xue-Qing Lu Yuan-Rong Guo Zhi-Yu Fang Jia-Xun Zhu Kun

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

(Received 16 December 2005 ; revised manuscript received 8 February 2006)

Abstract

The simulated and measured electric field distributions along the separated function radio frequency quadrupoles(SFRFQ) are presented in this paper. Based on the simulations , the parameters of flake-electrode and the effective gap voltage gain have been optimized. As a design example , one set of SFRFQ electrode with 5 periods and inter-electrode voltage 70 kV is designed to accelerate O^+ from 1MeV to 1.5MeV.

Keywords : separated function radio frequency quadrupoles , RELAX3D , energy gain , reverse field

PACC : 0150P , 2915D , 2921

* Project Supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 10455001).

[†] E-mail : wangzhi@pku.edu.cn