

# 分离作用RFQ加速器物理特性的研究\*

方家驹<sup>1)</sup> 颜学庆 李纬国 郭之虞 郭菊芳 陆元荣

高淑丽 朱昆 王智 于茂林 陈佳洱

(北京大学物理学院重离子物理研究所 北京 100871)

**摘要** RFQ加速器中加速效率随加速能量的增高而下降,为克服由此导致的RFQ能量局限而提出的分离作用RFQ加速结构,在仍保持采用射频四极场聚焦的同时,将加速与聚焦作用相分离.综述了对它的加速效率、反场问题、腔体及束流特性研究的结果,初步证实了其可行性及在较高能量区加速效率得到提高,并对正在研制的一台采用了这种分离作用RFQ的1.5MeV组合加速器做了介绍.

**关键词** 射频四极场 RFQ 分离作用 光阑型

## 1 常规RFQ加速效率与能量局限

常规RFQ是利用四极场电极形状的调制,从而在束轴附近同时产生加速和聚焦电场分量,来实现连续的加速和聚焦的.它在一个单元长度 $\beta\lambda/2$ 上,电荷数为 $q$ 的离子的能量增益为

$$\Delta W_c = q \cdot A_c \cdot T_c \cdot V \cdot \cos \phi_s, \quad (1)$$

加速因子

$$A_c = (m^2 - 1) / [m^2 I_0(ka) + I_0(mka)], \quad (2)$$

$m$ 为极面调制因子,  $I_0$ 为零阶虚宗量贝塞尔函数,  $k = 2\pi/\beta\lambda$ ,  $a$ 为孔半径,  $V$ 为极间电压,  $\phi_s$ 为同步离子相位,  $T_c$ 为渡越时间因子,在常规RFQ中 $T_c \approx \pi/4$ .在RFQ中表征高频效率的比功率阻抗:

$$\rho = V^2 / (\Delta P / L), \quad (3)$$

其中 $\Delta P$ 为腔长 $L$ 上的射频功率损耗,可得常规RFQ中一个单元上的能量增益-射频功耗比:

$$G_c = \Delta W_c / \Delta P = (2q\rho_c \cos \phi_s / \lambda V) / (T_c A_c / \beta), \quad (4)$$

RFQ中离子能量增益主要在加速段取得,这时 $A_c$ 变化不大,由式(4)可得 $G_c \propto 1/\beta$ ,这就是常提到的,在常规RFQ中加速效率,即能量增益-射频功耗比是随加速能量的增高而下降的,这就出现了加速能量的局

限性.要突破它,从式(4)看出一般有可能改变的仅有使 $A_c$ 随 $\beta$ 增大.但在常规RFQ中有关系式:

$$A_c \cdot I_0(ka) + F_c = 1 \quad \text{或} \quad A_c + F_c \approx 1, \quad (5)$$

$F_c$ :为表征聚焦力大小的聚焦因子.从式(5)看出, $A_c$ 的增大将导致 $F_c$ 减小,这对径向稳定性是不允许的,通常在常规RFQ加速段中 $A_c \approx F_c \approx 0.5$ .由此看出,常规RFQ中加速效率下降及能量局限是来自于本身机制所决定的,这正是分离作用RFQ要解决的关键问题<sup>[1]</sup>.

## 2 分离作用RFQ加速结构

基于以上分析,分离作用RFQ采用了效率较高的间隙加速,而在加速间隙间仍然采用了射频四极场聚焦.一种光阑型SFRFQ加速结构的中心部位见图1.其中两组四极场电极的电压与相位均与常规RFQ中相同.光阑片1与2间和光阑片3与4间均为加速间隙,

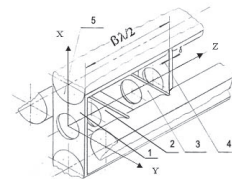


图1 光阑型SFRFQ中心部位结构图

\*国家自然科学基金(10455001)资助  
1) E-mail: jxfang@pku.edu.cn

它们相距为  $\beta\lambda/2$ ，是一个单元长度，它们的加速电场在同一时刻正好相位相反，因此同步离子可受到连续加速。而在两加速间隙以外，则仅受到径向电场的聚焦作用。这就是分离作用的基本原理，因此称作分离作用 RFQ 加速结构 SFRFQ (Separated Function RFQ)。SFRFQ 中一个单元上的能量增益为

$$\Delta W_s = q \cdot T_s \cdot V \cdot \cos \phi_s, \quad (6)$$

类似于常规 RFQ 中的式 (3) 与 (4) 可得 SFRFQ 的能量增益-射频功耗比：

$$G_s = \Delta W_s / \Delta P = (2q\rho_s \cos \phi_s / \lambda V) / (T_s / \beta). \quad (7)$$

由式 (4) 和 (7) 在相同条件下得到

$$G_s / G_c \approx (\rho_s / \rho_c) (T_s / T_c) (1 / A_c), \quad (8)$$

$s$  为 SFRFQ， $c$  为常规 RFQ 对式 (8) 的估算。右边第一项因子：对我们以后要研制的整体分离环型 ISR-SFRFQ 和 ISR-RFQ，因主要射频功耗是在相同的支撑环臂上，因此有  $\rho_s / \rho_c \approx 1$ 。第二项因子： $1 \geq T_s \geq \pi/4$ ，当加速场较单元长越短时，越近于 1<sup>[2]</sup>。而  $T_c \approx \pi/4$ ，因此  $T_s / T_c \geq 1$ 。第三项因子： $1 / A_c \approx 1/0.5 \approx 2$ 。因此有：

$$G_s / G_c \geq 2. \quad (9)$$

(9) 式表明，在满足以上讨论的条件下，SFRFQ 的加速效率有可能较常规 RFQ 增加一倍以上，它主要来自于 SFRFQ 的间隙加速因子  $\approx 1$ ，较常规 RFQ 中的  $A_c \approx 0.5$  大。由于 SFRFQ 有较高的加速效率，因此它可将离子加速到较常规 RFQ 更高的能量。上述估算将为本文后面进一步的计算结果所印证。

### 3 SFRFQ 的反场问题与解决办法

对轴上电场分布的进一步计算与模型测量发现，在相邻的加速间隙之间存在着与加速场方向相反的反向轴向电场分量，它是由于光阑片与它两侧相邻的两个电极间的反相电位差产生的。计算和测量还表明，增加光阑片的厚度，既可以移动反场位置，又可以减弱反向场。因此一个解决反向场的办法是选择适当的光阑片厚度，将反场移到对离子具有合适电场相位的位置处，使离子到达该处时反场很弱，有时甚至可以利用反场加速离子<sup>[3]</sup>。

图 2(a) 给出了一种不对称的光阑片解决反场的方案：一组同电位光阑片中，一个采用薄光阑片，其反场将减速离子；另一个则采用厚约  $\beta\lambda/4$  的光阑片，将

反场移到这一单元的中间附近，当同步离子到达该处时，射频电场时间因子近于零，使离子经历很弱的反场，在图 2(b) 的离子能量增益曲线上，它甚至补偿了前一减速能量。

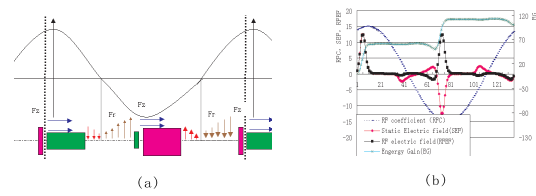


图 2 (a) 不对称光阑片结构; (b) 电场分布与能量增益。

## 4 整体分离环型光阑 SFRFQ 加速器

光阑 SFRFQ 需要支撑并提供激发所需的射频电压。我们已建造的 1MeV 整体分离环型 RFQ 是采用整体分离环来支撑与激发微翼四极场电极的<sup>[4]</sup>。整体分离环 (ISR-Integrated Sprit Ring) 不仅效率高，而且结构稳定<sup>[5]</sup>，很适合于用来支撑与激发 SFRFQ，因此我们正在建造一台 26MHz ISR-SFRFQ 加速腔，把 ISR-RFQ 输出的 1MeV O<sup>+</sup> 离子直接加速到 1.5MeV 能量，构成一台 1.5MeV RFQ 组合加速器。

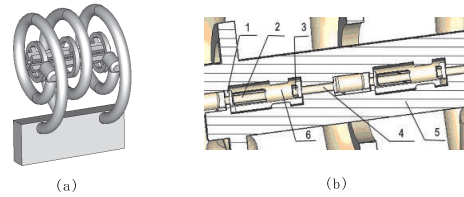


图 3 (a) ISR-SFRFQ 结构图; (b) 不对称光阑片结构。

表 1 ISR-SFRFQ 与 ISR-RFQ 加速腔的特性及比较

	ISR- RFQ	SFRFQ
frequency/MHz	25.4	24.1
specific shunt impedance $\rho/(k\Omega \cdot m)$	336	298
$\beta\lambda/2/\text{mm}$	68	68
cavity length/m	0.4	0.4
$Z_{\text{eff}}(\cos \phi_s)^2(\phi_s = -25^\circ)/(\text{M}\Omega/\text{m})$	13.3	31.0
modulation, m	2	1
$Q$	3393	3312
$E_{\text{pk}}/(\text{MV}/\text{m})$	12.1	14.5
intervane voltage V/kV	70	70
kilpatrick ratio	1.51	1.8

围绕对 ISR-SFRFQ 的研制，首先对它的腔体用 MWS 程序进行了数值模拟计算与优化，采用的 ISR-SFRFQ 及不对称  $\beta\lambda/4$  光阑片结构见图 3(a) 及 3(b)，并与相同参数的 ISR-RFQ 结构进行了对比，结果见表 1<sup>[6, 7]</sup>，其中 ISR-SFRFQ 的比路阻抗  $\rho$  与 ISR-RFQ 的相近，说明 (8) 式中取  $\rho_s / \rho_c \approx 1$  是合理的；表 1

中用纵向有效特性阻抗来表征 ISR-SFRFQ 的加速效率, 说明了它较 ISR-RFQ 高, 这与式 (9) 是一致的.

为了对 ISR-SFRFQ 的束流动力学特性进行计算, 根据下式 (10), (11) 中的  $A$  与  $F$  引入了等效的加速因子  $A_{\text{eff}}$  与聚焦因子  $F_{\text{eff}}$ :

$$\Delta W = q(\pi/4)A \cdot V \cdot \cos\phi_s, \quad (10)$$

$$\sigma_{t0}^2 = F^2 \frac{B_0^2}{8\pi^2} + \Delta_{\text{rf}}, \quad (11)$$

对一台 1MeV ISR-RFQ 后接一台 ISR-SFRFQ, 将  $O^+$  离子加速到 5MeV 的组合加速器计算的束流动力学结果列于表 2 中. 为比较, 对一台 5MeV 的 ISR-RFQ 加速器的计算结果也列于表 2 中. 从表中看出在相同条件下, 为取得 5MeV 加速能量, ISR-SFRFQ 组合加速器所需长度仅约 ISR-RFQ 的一半, 而每单元能量增益则为后者的 1.7 倍, 这也印证了式 (9) 的估算, 这些都证实了 SFRFQ 在较高加速能量区的优势. 现在,

26MHz 1.5MeV  $O^+$  离子组合加速器的研制工作正在进行中. 它将为 SFRFQ 加速器的进一步发展与应用打下基础.

表 2 ISR-SFRFQ 与 ISR-RFQ 的束流特性及比较

	ISR-SFRFQ	ISR-RFQ
beams	$O^+$	$O^+$
frequency/MHz	26	26
beam current/mA	5	5
injection energy/MeV	1	1
output energy/MeV	5	5
intervane voltage/kV	70	70
cell number	82	142
average $\Delta W$ per cell/keV	48.8	28.2
synchronous phase	$-25^\circ$	$-25^\circ$
modulation	1	2.04
length/m	9	16
aperture/mm	5	6.4
transmission	92%	95%

## 参考文献(References)

- 1 CHEN Jia-Er, FANG Jia-Xun, LI Wei-Guo et al. Progress on Natural Science, 2002, **12**(1): 23 (in Chinese) (陈佳洱, 方家驯, 李伟国等. 自然科学进展, 2002, **12**(1): 23)
- 2 CHEN J E, YAN X Q, FANG J X et al. Proc. of EPAC 2002, Paris
- 3 YAN Xie-Qing, FANG Jia-Xun, WU Yu et al. Acta Physica Sinica, 2002, **6**(51): 1135 (in Chinese) (颜学庆, 方家驯, 吴喻等. 物理学报, 2002, **6**(51): 1135)
- 4 LU Y R, GUO J F, LI W G et al. NIM, 1999, **A420**: 1
- 5 FANG J X, CHEN J E. IEEE. Trans. NS., 1985, **32**(5): 2891
- 6 CHEN J E, YAN X Q, FANG J X et al. Proc.ofAPAC2004, Korea
- 7 YAN X, CHEN J E, FANG J X et al. NIM, 2005, **A539**(3): 606

## Study on Physical Performance for Separated Function RFQ\*

FANG Jia-Xun<sup>1)</sup> YAN Xue-Qing LI Wei-Guo GUO Zhi-Yu GUO Ju-Fang LU Yuan-Rong  
GAO Shu-Li ZHU Kun Wang Zhi YU Mao-Lin CHEN Jia-Er

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

**Abstract** A new Separated Function RFQ (SFRFQ) accelerating structure has been proposed and studied. The paper summarizes the study results, concerning the accelerating efficiency, reversed field, cavity and ion beam performance.

**Key words** radio frequency quadrupole, RFQ, separated function, diaphragm type

\*Supported by NSFC (10455001)

1) E-mail: jxfang@pku.edu.cn