

# 一种新型低能加速结构 (RFQ) 及其应用

样 华

近年来发展了一种新型的低能加速结构,叫做高频四极透镜加速结构,简称 RFQ. 这种加速结构有许多特点,引起人们极大兴趣和关注. 它可作为漂移管直线加速器的注入器,而且在等离子体加热和诊断,粒子物理研究及核物理研究、重离子诱发核聚变等方面将得到应用. 下面先谈谈漂移管直线加速器在低能端面临的一些困难,然后介绍 RFQ 加速结构的工作原理、特点及应用.

## 一、引言

我们知道在通常的漂移管直线加速器(见图 1)里,沿着圆柱形高频腔的轴向装有一系列金属圆筒,叫漂

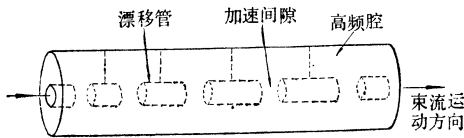


图 1 漂移管直线加速器示意图.

移管. 漂移管之间的间隙,叫加速间隙. 当腔内被激励起所需要的高频场分布时,在漂移管内没有电场,但在加速间隙里有交变电场,粒子每通过一次加速间隙将得到一次加速,能量逐步增加. 在漂移管内装有四极磁透镜(见图 2),它的磁场对偏离轴上运动的粒子有横向聚焦作用.

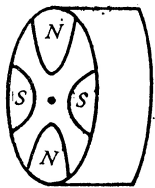


图 2 四极磁透镜

由于这种作用力与磁场高低和粒子速度大小成正比,而且作用强度与力的作用区间(即磁场区域)长短成正比. 在漂移管直线加速器里,漂移管的长度和透

镜的长度都是按粒子能量增加而增长设计的,在低能端粒子能量最小,速度最小,对应的漂移管长度和透镜长度都最短,而那里束流中粒子之间的相互排斥作用,即通常所说的空间电荷效应又特别严重. 因此,要想克服这一效应,就得有较强的横向聚焦作用. 为此,要求低能端透镜的工作磁场最高(如高达 1.3 万高斯左右),这样,透镜的励磁功率大,励磁绕组欧姆损耗大,透镜发热严重,相应的透镜制造等方面带来困难. 为了减小这低能端的困难,就希望漂移管直线加速器的注入能量尽可能高. 但是,在发明 RFQ 之前,漂移管加速器的注入器通常都采用高压型加速器,因此,注入

能量高则意味着高压型加速器输出电压越高,它的制造也就越困难. 为了兼顾这两方面,那时的漂移管加速器的注入能量,既不能选得太高,也不能太低,一般都选为 750 千电子伏左右(对质子而言).

如果采用 RFQ 作为漂移管加速器的注入器,就可适当地把漂移管加速器的注入能量选得高一些,而 RFQ 加速器的注入能量又是较低的(如几十千电子伏的质子),因此,利用 RFQ 后,将圆满地解决上述的漂移管加速器低能端和高压型加速器方面所面临的困难.

## 二、工作原理

RFQ 加速结构的示意图如图 3 所示. 在圆柱形高频腔内,如果沿腔的方位角对称安放四个电极,电极

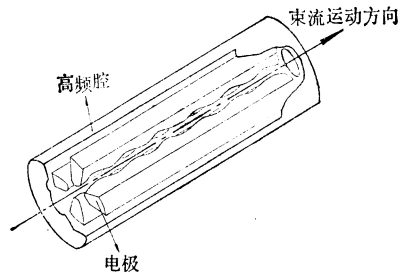


图 3 RFQ 加速结构示意图

的极顶沿  $z$  轴方向是调变的,而且  $x$  方向和  $y$  方向上极顶的最大值和最小值交替排列,即当  $x$  方向的极顶为最大值时,  $y$  方向的极顶就是最小值. 在同一个电极上相邻的极顶最大值与最小值之间的距离,称为一个加速单元. 当腔内激励起所需要的高频电场分布时,则腔内极顶附近的电场,除了有四极电场分量(见图 4(a))外,还有轴向电场分量(见图 4(b)). 四极电场分量用于对粒子横向聚焦,在图 4(a)所示场的瞬时分布下,对于正离子来讲,在  $x$  方向使粒子指向轴线,起聚焦作用;在  $y$  方向使粒子背向轴线,起散焦作用. 但是,由于电场是交变的,因此,在另一瞬时将会出现相反情

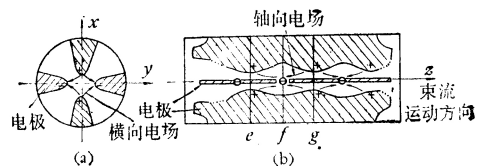


图 4 RFQ 极间电场瞬时分布示意图

况,即  $x$  方向散焦,  $y$  方向聚焦。从几何光学可知,由焦距相同的凸凹光学透镜所组成的系统,其组合作用的总效果是聚焦的,这一原理也可推广到束流光学上。因此,上面所说的 RFQ 中的一会聚焦一会散焦的交变作用,其总效果是聚焦的。RFQ 的轴向电场分量用于加速粒子,使粒子得到能量增益。在图 4(b) 所示场的瞬时分布下,如果  $ef$  单元的电场是加速电场,  $fg$  单元的电场则是减速电场。但是,由于电场是交变的,如果粒子在  $ef$  单元上得到加速,当它到达  $fg$  单元时,正好电场方向改变,因而,粒子在  $fg$  单元仍能得到加速,即每通过一个加速单元都得到加速,只要 RFQ 的参数选得合适,就可以保证粒子在这种加速结构里运动是稳定的,达到最终能量。

### 三、主要特点

RFQ 的主要特点有: 第一、RFQ 是利用高频电场达到粒子加速和横向聚焦目的,它的横向聚焦作用与粒子速度无关,而且有交变聚焦作用性质,因而,它的聚焦作用较强。在低能情况下,空间电荷效应特别严重,要求有较强的横向聚焦作用。若采用磁场聚焦,则因粒子速度小,而聚焦作用较弱,难以满足要求;若采用电场聚焦,则其聚焦作用较强,容易满足要求。因此,RFQ 最适合加速低能束流。

第二、注入能量低,极限流强高。如质子 RFQ 的注入能量可以取 20~50 千电子伏,流强可达几十毫安以上。

第三、能散很小的连续束流注入到 RFQ 后,将经受缓慢的聚束和加速过程,因此,束流不易丢失,性能较好,发射度增长小,束流传输效率高达 80~90% 以上,这是一般低能束流传输系统所不及的。

第四、同一台 RFQ,既用来加速正离子,又可加速负离子,而只需要改变离子源即可。

第五、可加速重离子,其最宜加速粒子能量小于 1~2 兆电子伏的核子。

第六、与输出同样能量和流强的高压型加速器相比,其个子小得多,且无超高压的危险,运行安全、可靠。

### 四、主要应用

RFQ 加速器正日益发展,主要应用将有:

(一) 作普通漂移管直线加速器的注入装置,其相应的参数可参见表 1(1)。正如前面谈到的,在发明 RFQ 加速结构之前,对于中高能质子直线加速器的注入装置,通常都是由 750 千伏范德-格喇夫高压加速器、低能束流输运及高频聚束系统所组成,这是一种非常庞大、昂贵和复杂的系统。由于 RFQ 具有聚束和加速两项功能,故采用 RFQ 来代替这一系统就最合适。

(二) 作强流直线加速器的注入装置,此类应用的主要参数可参见表 1(2)。

(三) 作低能核物理研究装置,此类应用的 RFQ 参数可参见表 1(3)。RFQ 作这类应用时,有许多特点:第一,它的流强高达几十毫安至百毫安,远比静电加速器的流强度高。第二,同一台 RFQ 可适用于加速若干种荷质比不同的粒子。而且,同一种荷质比,又可加速不同种类的粒子。第三,其输出束流能散度可用散束器来降低,其输出能量亦可做成可调的。顺便指出:当 RFQ 用来加速氦核时,可作强流氦核中子源;也可作正极化氦核源;还可加速强流极化质子束到 1 兆电子伏左右。

(四) 作等离子体诊断,此类应用的 RFQ 可参见表 1(4)。利用 RFQ 把 100 毫安的  ${}^6\text{Li}^-$  加速到每个核子 1 兆电子伏,将这输出束流被剥离一个电子成中性原子后,注入到磁约束等离子体内,束流跟等离子体的氦离子进行双电荷交换反应,便可测得氦速度谱,从而知道等离子体内氦离子的速度分布,诊断出等离子体

表 1 RFQ 的应用

应用类别	离子种类	流强 (毫安)	注入电压 (千伏)	最后能量 (兆电子伏/核子)	工作频率 (兆赫)	腔长 (米)
(1) 普通直线加速器的注入器	$\text{H}^+, \text{H}^-$	60	25	0.75	200	0.93
	$\text{H}^+, \text{H}^-$	28	30	2.5	440	1.8
	$\text{D}^+$	100	75	1.0	80	3.88
(2) 强流直线加速器注入器	$\text{H}^+, \text{H}^-$	300	100	2.0	100	4.09
	$\text{He}^+, \text{C}^{3+}, \text{O}^{4+}, \text{Ne}^{9+}$ $\text{D}^+, \text{He}^{++}, \dots\dots$	10 25	50 25	1.0 1.0	200 200	4.24 4.24
(3) 核物理研究	$\text{Li}^-$	100	100	1.0	50	11.54
(4) 重离子聚变	$\text{Xe}^+, \text{U}^-$	50	300	0.08	12.5	27.7
(6) 回旋加速器的注入器	$\text{H}^+, \text{H}^-$	10	0.1	0.011	28	3.00

的状况。在作这种应用时，常希望输出束流能量不连续调节，因此，这时的 RFQ 可采用前面提到的由几个独立的若干段组成即可。

(五) 作重离子诱发核聚变的大型直线加速器的注入装置，其参数可参见表 1(5)。在研究重离子诱发核聚变可能性时，对大型直线加速器系统有着极大兴趣，其低能段有严格限制，用 RFQ 作它的低能段就特别适合。将 50 毫安的氙离子  $Xe^+$  束采用 RFQ 从 0.3 兆电子伏加速到 10 兆电子伏，然后再进一步加速到更高能量，将 32 个这种束流管组成 1.6 安的单电荷氙离子束，从不同方向上去轰击聚变靶以产生核聚变。

(六) 作大型回旋加速器的注入装置，此类应用的 RFQ 参数可参见表 1(6)。由于 RFQ 能提供聚束很好的束流，将这样束流注入到回旋加速器的轨道上，对于提高回旋加速器的引出效率，以及改善束流性能有着很大意义，所以，这时的 RFQ 主要起束流传输和聚束系统的作用。

(七) 其它应用。在等离子体加热及粒子束物理研究方面 RFQ 也将得到应用。而且，利用输出能量小于 1 兆电子伏的 RFQ，也可作离子注入机，供半导体材料、器件及电路研究和生产，或者供金属表面物理化学性能研究等应用。

以上只是简述了 RFQ 的应用，随着 RFQ 加速器技术发展，它必将在更多的方面得到应用。