

70MHz 连续波质子束脉冲化装置*

安世忠¹⁾ 张天爵 吴隆成 吕银龙 宋国芳 管锋平 贾先禄

(中国原子能科学研究院 北京 102413)

摘要 为了进行强流回旋加速器关键技术研究, 中国原子能科学研究院建立了一个强流回旋加速器综合试验装置. 中国原子能研究院将在这个回旋加速器综合试验装置上建立强流脉冲化实验装置, 目标是实现几十至百 keV 量级的强流束的脉冲化. 具体是将 70MHz 连续波负氢束脉冲化为重复频率 1—8MHz, 脉冲宽度约为 10ns 的脉冲质子束. 脉冲化装置将主要包括束流切割器和聚束器两大系统. 聚束器采用频率为 70.487MHz 的双间隙单漂移栅网结构, 可以将直流束压缩到 $\pm 30^\circ$ 的回旋加速器高频接受相宽之内. 束流切割器将采用频率为 2.2MHz 的正弦波, 切割后的脉冲宽度将小于 8ns, 最后得到的脉冲束的重复频率为 4.4MHz.

关键词 脉冲化 聚束器 切割器 注入线

1 引言

为了进行强流回旋加速器关键技术研究, 中国原子能科学研究院建立了一个引出能量为 10MeV 的强流回旋加速器综合试验装置. 目前, 这个试验装置正在调束, 束流已经成功地注入. 中国原子能研究院将在这个回旋加速器综合试验装置上建立强流脉冲化实验装置, 目标是实现几十至百 keV 量级的强流束的脉冲化. 具体是将 70MHz 连续波负氢束脉冲化为重复频率 1—8MHz, 脉冲宽度小于 10ns 的脉冲质子束. 为此, 首先在注入线上安装脉冲化装置, 实现负氢束的脉冲化, 然后再将脉冲化后的负氢束注入到回旋加速器加速到需要的能量后, 通过回旋加速器引出脉冲质子束. 因此, 脉冲化的第一步目标是在注入线上实现负氢脉冲化. 脉冲化装置将主要包括束流切割器和聚束器两大系统. 为了更好地和回旋加速器的匹配, 聚束器将采用频率和主回旋加速器同频的 70.487MHz. 束流切割器的设计是脉冲化研究的关键, 也是难点. 经过多方论证, 切割波形将采用频率为 2.2MHz 的正弦波, 切割后的负氢脉冲宽度将小于 8ns. 经过回旋加速器的加速以后, 最后得到的质子脉冲束的重复频率为 4.4MHz, 脉冲宽度小于 10ns.

通过对切割器和聚束器的工作原理进行理论分析和多粒子跟踪, 基于脉冲化系统的需求, 同时充分考

虑了回旋加速器的匹配要求, 设计了包含脉冲化系统在内的注入线. 目前, 此注入线正在进行机械设计, 部分组件已经开始加工.

2 聚束器的设计和模拟计算

2.1 聚束器基本原理

连续束段中的带电粒子在聚束器的调制作用下经过一段距离的飞行之后, 形成很窄的脉冲, 这个脉冲宽度, 必须得小于回旋加速器中高频的接收相宽, 从而使压缩后的脉冲束全部被回旋加速器高频系统捕获. 从 10MeV 回旋加速器的高频频率和接受相宽来看, 聚束器采用和主加速器同频率的 70.487MHz, 可以将直流束压缩到高频的接受相宽 $\Delta\phi = \pm 30^\circ$, 相对应的束流脉冲宽度为 2.36ns, 符合束流脉冲化后的脉冲宽度的要求.

聚束器采用双间隙单漂移栅网结构(图 1), 外部的两块栅网接地, 中间电极的长度为 $0.5\beta\lambda$, 栅网由 $50\mu\text{m}$ — $100\mu\text{m}$ 的镀金钨丝制成, 可以不影响粒子从中通过. 在非相对论情况下, 聚束波形使用正弦波, 则聚束器调制的电压幅值为^[1]

$$V_m(\text{kV}) = 35.4 \cdot \frac{1}{f(\text{MHz}) \cdot L(\text{m})}. \quad (1)$$

选取聚焦长度为 1.4m, 聚束器电压幅值选择为 1.5kV.

2008 - 01 - 07 收稿

* 国家自然科学基金(10775186)资助

1) E-mail: szan@ciae.ac.cn

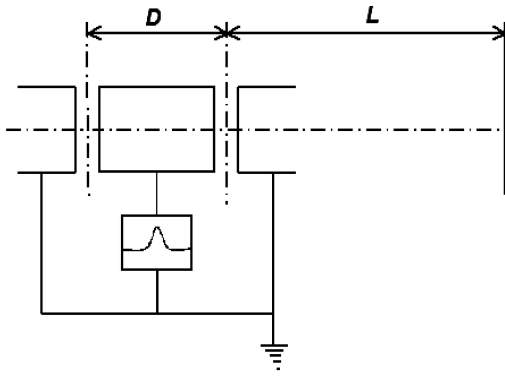


图 1 双间隙单漂移聚束器

2.2 聚束器的模拟计算

图2显示了聚束器的模拟计算结果. 在漂移距离为1.4m情况下, 聚束效率随着流强的增加而降低, 到流强为3.5mA时, 已经降到了52%, 同时能散也下降到1.1%. 因此, 流强可以限制在3mA以下.

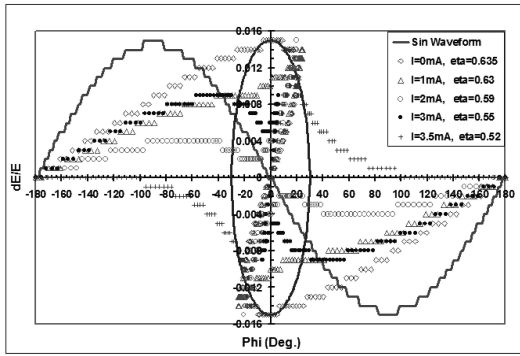


图 2 聚束器模拟计算结果

3 束流切割器

由于正弦波聚束器, 只能对相位大约在 $\pm 110^\circ$ 之间的束流进行有效聚束, 所以要求扫描切割所获得的脉冲宽度也应小于这个相位宽度. 为了提高有效流强, 应尽可能提高这个比例. 对应聚束器的高频频率 $f=70.487\text{MHz}$, 切割器所切割后的脉冲宽度应小于8ns.

扫描切割器的电压波形为正弦波, 而在一个正弦波扫描切割周期内, 束流往程和回程二次扫过狭缝, 则一个扫描周期内可以产生两个脉冲. 切割器的频率选择为聚束器的工作频率的32分频 2.203MHz , 则最后产生的脉冲重复频率为 4.405MHz . 切割器的结构如图3所示. l 是切割板长度, g 是切割板的间隙, S 是切割板到切割孔(狭缝)之间的距离, r 是切割孔的半径.

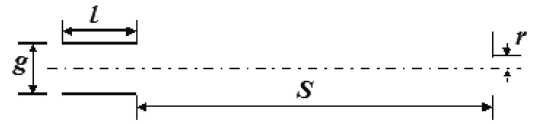


图 3 扫描切割器示意图

切割板两板间加相反的电压:

$$V(t) = V_m/2 \cdot \sin(\omega t + \varphi_0). \quad (2)$$

对于切割器的参数考虑, 一方面要保证在切割宽度之外的粒子经过切割器后受到足够的KICK而被后面的选择狭缝切掉, 另一方面我们还必须得考虑偏掉的粒子在切割器内不能打到切割板上. 对于切割宽度为 7ns ($\Delta\phi = \pm 3^\circ$)的情况. 取 $V_m=12\text{kV}$, $g=4\text{cm}$, 切割板长度为 10cm . 选择从切割器到后面的选择狭缝处没有任何聚焦原件, 只是漂移段的情况. 选漂移段的长度为 50cm . 现在计算3种粒子的运动情况: 脉冲中心、脉冲头部、脉冲尾部, 并且假设这3种情况下的粒子的初始横坐标 $x=x'=0$. 结合程序TRACE3D^[2]对单粒子束流进行跟踪, 其结果见图4. 这3种粒子的运动, 分别表示了束流的横向中心位置经过切割器后的运动状况. 切割后的脉冲宽度将依赖于选择狭缝的大小, 因此就要求初始的束流发射度能尽可能的小.

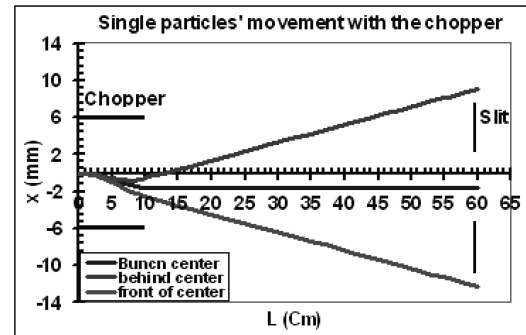


图 4 3种粒子经过切割器和漂移段后的运动轨迹

4 注入线的设计

总体脉冲化布局采用ESQQ结构, 见图5, 采用程序TRACE-3D计算了注入线的束流包络. 注入线总的长度是 2.3625m , 初始发射度为 $48\pi\text{mm}\cdot\text{mrad}$.

离子源出来的束流, 首先经过三圆筒静电单透镜聚焦后, 在后面成一个狭长的双腰, 束流切割器和聚束器一起放在这个共同的腰位上, 切割器放在聚束器的后面. 束流经过聚束器和切割器后, 由螺线管透镜、双四极磁透镜聚焦单元传输到用于主回旋加速器注入的静电偏转板. 螺线管前面放置了狭缝, 这个狭缝就是切割器的工作狭缝. 从切割器到狭缝的相移为 45° ^[3].

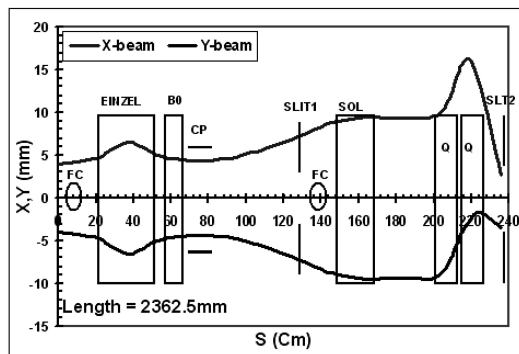


图 5 注入线的束流包络与元件布局

(图中各个符号代表的元件: FC—法拉第筒; SLIT—狭缝; EINZEL—三圆筒静电单透; B0—聚束器; CP—切割器; SOL—螺线管透镜; Q—磁四极透镜).

5 结论

基于回旋加速器的束流脉冲化试验装置在原子

能科学研究院得以研制. 为了更好地和回旋加速器的匹配, 聚束器将采用频率和主回旋加速器同频的 70.487MHz. 束流切割器将采用频率为 2.2MHz 的正弦波, 切割后的负氢脉冲宽度将小于 8ns. 经过回旋加速器加速以后, 最后得到的质子脉冲束的重复频率为 4.4MHz, 脉冲宽度小于 10ns. 由于束流切割器采用的是正弦波切割电压波形, 将会带来横向的发射度增长, 而且切割器本身要求束流的发射度越小越好^[4]. 因此, 在离子源的出口处加了发射度限制装置. 在保证流强为 3mA 的情况下, 可以将发射度限制在 $50\pi \cdot \text{mm} \cdot \text{mrad}$ 以下.

作者在完成本工作的过程中, 多次与高能物理研究所的唐靖宇研究员、北京大学的吕建钦教授、德国 Juelich 研究中心的 Dr. Bongardt、意大利 LNS 的 Dr. Calabretta 进行了讨论, 而且唐靖宇老师还提供了聚束器的模拟计算程序. 对于他们对本工作的建议和帮助, 作者深表感谢.

参考文献(References)

- 1 LÜ Jian-Qin, QUAN Sheng-Wen. Atomic Energy Science and Technology, 1995, **29** (in Chinese)
(吕建钦, 全胜文. 原子能科学技术, 1995, **29**)
- 2 Crandall K R, Rusthoi D P. TRACE 3-D Documentation, LA-UR-97-886, May 19
- 3 BROWN K L. Beam Envelope Matching for Beam Guidance Systems. NIM, 1981, **187**: 51—65
- 4 Belmont J, Joho W. Chopping and Bunching on the TRIUMF 300keV Injection Line, TRI-DN-73-16, May 1973

A 70MHz Pulsing Beam System for Protons*

AN Shi-Zhong¹⁾ ZHANG Tian-Jue WU Long-Cheng LÜ Yin-Long SONG Guo-Fang
GUAN Feng-Ping JIA Xian-Lu WEI Su-Min
(China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China)

Abstract A test beam line for pulsed beam generation for 10 MeV central region model (CRM) of a compact cyclotron is under construction at China Institute of Atomic Energy (CIAE). A 70MHz continuous H^- beam with the energy of dozens of keV or a hundred keV will be pulsed to a pulse length of less than 10ns with the repetition rate of 1—8MHz. A 70.487MHz buncher will be used to compress the DC beam into the RF phase acceptance of $\pm 30^\circ$ of the CRM cyclotron. The 2.2MHz sine waveform will be used for the chopper. A pulse with the repetition rate of 4.4MHz and pulse length less than 10ns is expected after CRM cyclotron.

Key words pulsing, buncher, chopper, injection-line

Received 7 January 2008

* Supported by NSFC (10775186)

1) E-mail: szan@ciae.ac.cn