

文章编号: 1007-4627(2009)03-0198-05

CSR 纵向束团压缩腔研究^{*}

殷达钰^{1,2}, 刘 勇^{1, #}, 解庆春³, 李 朋^{1, 2}

(1 中国科学院近代物理研究所, 甘肃 兰州 730000;

2 中国科学院研究生院, 北京 100049;

3 湖南大学计算机与通信学院, 湖南 长沙 410082)

摘 要: 针对兰州重离子加速器冷却储存环的发展目标, 为了满足高能量密度(涉及重离子驱动惯性约束核聚变新能源)等物理研究的需要, 使用三维电磁场计算程序 MAFIA 研究了一种新型的适用于 CSR 的纵向束团压缩腔。此纵向束团压缩腔采用高磁导率软磁合金材料进行加载, 相比于铁氧体加载的高频腔, 可以得到高的电场梯度。以 250 MeV/u 的 $^{238}\text{U}^{72+}$ 离子为例进行了模拟计算, 得出了此纵向束团压缩腔的工作频率为 1.15 MHz, 峰值工作电压为 80 kV, 由两个 1/4 波长同轴谐振腔组成, 每个谐振腔峰值工作电压为 40 kV, 能够满足在 CSR 上进行纵向束团压缩的要求。

关键词: 纵向束团压缩腔; 高磁导率; 高磁导率软磁合金; MAFIA 程序

中图分类号: TL503.1

文献标识码: A

1 引言

高流强、高品质的重离子束流将会为高能量密度物理(涉及重离子驱动惯性约束核聚变新能源前期研究)、物质科学、凝聚态物理、原子和分子物理等众多基础科学及应用研究提供新的实验平台, 同时也对加速器的束流指标提出了更高的要求。兰州重离子加速器冷却储存环(HIRFL-CSR)^[1]的建成以及国内有关装置的顺利进展, 为高流强、高品质重离子束的实现提供了条件。德国^[2, 3]、日本^[4]和美国等国家的一些重离子加速器中心对高流强、高品质重离子束动力学及其获取装置进行了研究, 为高流强、高品质重离子束相关物理的发展做出了重大贡献, 促进了高能量密度物理及相关学科的发展。为了能在 HIRFL-CSR 上进行高能量密度物理实验^[5], 必须对 CSR 中的重离子束团进行纵向压缩以得到适用于实验要求的高流强、高品质、纳秒级脉冲宽度的高能重离子束。压缩方法就是通过高频电压幅度的快速上升而使束团边界和相空间轨迹的不吻合而导致束团在纵向相空间得到 90°的旋转。束团在纵向相空间的旋转必须借助于重离子束团纵

向压缩装置——CSR 纵向束团压缩腔来完成。为了能将 250 MeV/u、脉冲长度为 200 ns^[6]的 $^{238}\text{U}^{72+}$ 重离子束团压缩到满足等离子物理实验要求的 50 ns 短脉冲束团, 根据束团非绝热压缩原理, 所需要的最终峰值高频工作电压必须达到 80 kV。本文对 CSR 纵向束团压缩腔进行了设计和模拟, 给出了它的主要参数。

2 CSR 纵向束团非绝热压缩原理

CSR 中束团的纵向压缩有两种选择: 一种是采用高频电场缓慢上升的绝热(adiabatic)捕获过程得到与纵向场匹配的束团, 压缩得到的束团长度大约与高频电压的四次方根成反比; 另一种非常有效的方法就是通过高频电压幅度的快速上升而使束团边界和相空间轨迹的不吻合而导致束团在纵向相空间得到 90°的旋转, 这种纵向束团压缩理论已经在德国重离子研究中心(GSI)的同步加速器(SIS)上得到了应用。

在一次谐波状态下运行的重离子束团由于受到高频电压的突然上升而在纵向相空间得到 90°的旋

* 收稿日期: 2009-02-16; 修改日期: 2009-03-09

* 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10635090)

作者简介: 殷达钰(1978—), 男(汉族), 甘肃金塔人, 博士研究生, 从事加速器物理研究; E-mail: yindy@impcas.ac.cn

通讯联系人: 刘勇, E-mail: y.liu@impcas.ac.cn

转, 从而造成束团的快速非绝热压缩, 假设高频捕获电压幅度为 V_i , 用于束团压缩的高频电压幅度为 V_f , 压缩前重离子束团的动量分散为 $\Delta p/p_0$, 则压缩后最终的束团长度由下式决定:

$$l_f \approx \sqrt{\frac{A}{q} \left(\frac{V_i}{V_f} \right) \frac{\Delta p}{p_0}}, \quad (1)$$

其中, A 为离子质量数, q 为离子电荷态, V_i 为高频捕获电压, V_f 为最终高频电压, $\Delta p/p_0$ 为初始束团的动量分散。离子束团压缩前后的压缩比率为

$$\frac{l_i}{l_f} = \left(\frac{V_f}{V_i} \right)^{1/2}, \quad (2)$$

其中, l_i , l_f , V_i , V_f 分别为压缩前后的束团长度和束团在压缩腔中的俘获高频电压和最终高频电压。从公式中不难看出, 离子束团最终长度大大依赖于初始束团动量分散, 同时离子束团最终长度大约与最终高频电压的平方根成反比, 因此要想得到持续时间足够短的离子束团, 就必须使被压缩离子束团的动量分散尽量小, 同时, 被压缩离子束团受到足够高的高频电压。与绝热捕获过程相反, 束团旋转压缩要求的高频电压上升时间要尽量快, 大约为 $12 \mu\text{s}$, 要短于同步振荡周期, 大约在 $1/4$ 同步振荡周期, 也就是大约 $220 \mu\text{s}$ 以后, 束团长度达到最短值。束团旋转压缩是非绝热(non-adiabatic)过程, 得到的束团不是匹配状态, 必须立即快引出储存环进行物理实验。束团旋转压缩可以将全环累计的中能及高能重离子束流压缩到纳秒量级的长度, 这就为极端条件下开展高能量密度和等离子体物理的实验提供了条件。

在德国 GSI 的 SIS 上, 为了能使重离子束流在等离子体物理研究方面提供良好的实验平台, 早在 2000 年就提出了将能量为 200 MeV/u , 离子数为 1×10^{11} 的 U^{28+} 重离子束团在纵向上进行压缩^[7], 等离子体物理研究需要的重离子束团长度为 50 ns , 根据重离子束团压缩原理, 需要的最终高频电压为 200 kV 。在日本理化学研究所(RIKEN), 通过这种方法, 在储存环重离子同步加速器(TARN II)上, 通过束团压缩, 束团电流从最初的 0.05 A 达到了压缩后的 5.372 A 。

为了能定量说明在储存环主环(CSR_m)上得到纳秒级重离子束团的情况, 以能量为 250 MeV/u 的 $^{238}\text{U}^{72+}$ 为例来进行计算模拟。当 $^{238}\text{U}^{72+}$ 离子在

CSR_m 中的能量为 250 MeV/u 时, 束流回旋周期为 873 ns 。根据 CSR_m 束流运行情况, 假设重离子束流初始束团脉冲长度为 $1/4$ 回旋周期, 即 200 ns , 为了能获得达到满足高能量密度物理/等离子体物理实验要求的 50 ns 短脉冲束团, 根据束团压缩率公式(2), 当初始束团在纵向束团压缩腔中的高频俘获电压为 5 kV 时, 最终高频电压要在足够短的时间内达到 80 kV 。

3 CSR 纵向束团压缩腔原理及模拟计算

目前, 应用于 CSR_m 上的重离子束流加速的铁氧体加载的高频腔由于腔体本身的性质, 如较低的场梯度导致在有限长度的高频腔内不能得到用于重离子束团压缩的足够高的高频电压, 满足不了纵向束团压缩的要求, 因此要研制一种新型的高频腔用于对重离子束团进行纵向压缩。由于 CSR_m 上空间的限制, 所要研制的纵向束团压缩腔要足够短, 因此要求的纵向束团压缩腔能产生足够高的高频场梯度。

传统的铁氧体材料工作在超过一定的高频磁场强度条件下就会产生非线性磁滞现象而变得很不稳定, 通常铁氧体加载的高频腔的高频场梯度被限定在 10 kV/m 。为了解决这个问题, 纵向束团压缩腔需要采用一种新型的高磁导率软磁合金材料(FINEMET)^[8] 对其进行加载, 相对于铁氧体材料而言, FINEMET 材料及其加载的高频腔的特征如下:

(1) 设磁导率为 μ , 品质因数为 Q , 高频频率为 f , 当 FINEMET 工作在高达 0.2 T 的高频磁场下, 其 μQf 值仍能保持常数, 这就为 FINEMET 环加载的高频腔实现较高的高频场梯度提供了保证。FINEMET 材料加载的高频腔的高频场梯度可以达到 100 kV/m ^[9], 也就是说, 同样长度的高频腔使用 FINEMET 材料加载可以得到高于铁氧体材料加载 10 倍的高频场梯度, 即在产生同样大小的高频间隙电压幅度的情况下, 需要加载的 FINEMET 环的数目要比铁氧体环的数目减少 10 倍, 相应的高频腔体的长度为铁氧体加载腔体长度的 $1/10$ 。

根据高频场梯度和实验靶功率密度的关系,

$$\left(\frac{V_{\text{rf}}}{l} \right)^2 = A(\mu Qf) \bar{\rho}, \quad (3)$$

其中, V_{rf}/l 为高频场梯度, A 为堆积因子, 一般取 0.7, $\bar{\rho}$ 为平均功率密度, 不难看出, 当 μQf 为常数时, 为了能在实验物体上获得高的功率密度, 应尽可能提高高频场梯度。

(2) 相比铁氧体材料, FINEMET 材料具有高达 570° 的居里温度, 保证了腔体稳定地工作在相对较高的有效高频场梯度之下, 使得腔体的冷却问题也得到了很大的简化。

(3) 由于 FINEMET 材料工作在 1.15 MHz 高频功率时, 其磁导率虚部大于其实部, FINEMET 加载的高频腔具有较低的 Q 值 ($Q \approx 1$), 因此在腔体控制系统中, 不需要频率调节系统就能满足重离子束流频率较宽范围的要求, 这会大大降低研制的难度和费用。同时, FINEMET 材料对偏磁电场也很敏感, 在必要的情况下也可以通过在 FINEMET 材料上增加偏磁电场来改变材料的磁导率, 从而更大范围地改变腔体的工作频率。尽管 FINEMET 材料加载的高频腔体具有较低 Q 值, 但是在不大幅降低磁合金环 μQf 值的情况下, 也可以通过一种非常有效的方法提高腔体的 Q 值, 那就是在 FINEMET 加载环径向切口^[9], Q 值的提高幅度跟 FINEMET 环径向切口间隙长度有直接关系。一般情况下, 径向间隙长度越大, 腔体 Q 值的升高越多, 理想情况下, 腔体 Q 值可以增加 10 倍以上。铁氧体材料和 FINEMET 软磁合金材料的基本特征如表 1 所示。

表 1 部分 FINEMET 软磁合金材料和铁氧体材料的一些高频特性参数

高频特性 参量	FINEMET		铁氧体(Ni-Zn)
	FT-3M	FT-3L	ST-314
磁导率(1 MHz)	(1700, 3300)	(4600, 7000)	(1200, 250)
磁导率(5 MHz)	(550, 950)	(1300, 2500)	(500, 500)
饱和磁通密度/T		1.35	0.28
居里温度/ $^\circ\text{C}$		570	120

从以上内容可以看出, 软磁相比铁氧体材料加载的高频腔体, 软磁合金材料加载的高频腔体具有一系列优越的特性, 它的研制成功必然会为高能量密度/等离子体物理的研究提供有力保障。

根据腔体理论计算, 此腔体采用 FINEMET-FT-1M 软磁合金环加载, 是 $1/4$ 波长同轴谐振腔

结构, 这种结构所加载合金环的电感和间隙电容之间的谐振在腔体高频间隙产生了一定方向的电场, 腔体本身的高频参数可以采用 LC 等效电路进行计算, 电感 L 来源于负载合金环, 电容 C 来源于间隙和同轴谐振腔本身, 它们的大小直接由负载合金环的尺寸、磁导率、腔体的内外半径以及间隙宽度来决定。

当此纵向束团压缩腔采用 FINEMET-FT-1M 加载, 对于 FT-1M 软磁合金环, 假定其内外直径分别为 45 和 30 cm, 厚度为 2.5 cm, 当工作在 1.15 MHz 高频功率时, 磁导率 μ 为 (1100, 3000), $\mu Qf = 2.9 \times 10^9$ 。为了能得到用于纵向束团压缩的 80 kV 的高频电压, 结合考虑经济成本, 决定采用两个 $1/4$ 波长同轴谐振腔共同作用来提供所需的 80 kV 高频电压, 而每个 $1/4$ 波长同轴谐振腔的高频间隙电压为 40 kV, 根据发射机功率与腔体高频电压的表达式

$$P = \frac{U^2}{2R_s}, \quad (4)$$

其中, P 为发射机功率, U 为高频间隙电压, R_s 为腔体分路阻抗, 当发射机功率为 1.15 MHz 时, 为了能得到 40 kV 的间隙电压, 需要腔体的分路阻抗为 695 Ω 。单个软磁合金环的分路阻抗表达式为

$$R_s = \mu_0 t \ln \left(\frac{r_o}{r_i} \right) (\mu Qf), \quad (5)$$

其中, $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$, t 为合金环厚度, r_o 和 r_i 分别为合金环的外半径和内半径, $\mu Qf = 2.9 \times 10^9$, 为了达到 695 Ω 的分路阻抗, 单个腔体需要加载 18 个合金环才可以得到非绝热压缩要求的 40 kV 间隙高频电压。

对照德国 GSI 用于 SIS18 及 SIS100/200 的纵向束团压缩腔以及应用于 CSRm 的加速高频腔, 提出 CSRm 纳秒级重离子束的产生装置——CSRm 纵向束团压缩腔, 此纵向束团压缩腔由两个 $1/4$ 高频同轴谐振腔组成, 每个 $1/4$ 高频同轴谐振腔的具体参数如表 2 所示。

利用 MAFIA 对采用 FT-1M 软磁合金环加载的高频腔体的结构以及一些高频特性进行了模拟, 其构建的腔体形状如图 1 所示。

纵向束团压缩腔由两个如图 1 所示的 $1/4$ 同轴谐振腔单间结构组成, 此腔体是采用软磁合金材料 FINEMET-FT-1M 环进行加载, 单个 $1/4$ 同轴

谐振腔长度为 980 mm, 内、外导体半径分别为 50 和 300 mm, 间隙宽度为 50 mm。共加载有 18 个软磁合金环(加载环材料为 FT-1M), 环的内、外半径分别为 150 和 225 mm, 环的厚度为 25 mm。由于软磁合金材料具有高达 570 °C 的居里温度, 此腔体将直接采用风冷形式。

表 2 CSRm 单个 1/4 高频同轴谐振腔参数
(压缩腔)与 CSRm 加速腔参数的比较

参数名称	CSRm 加速腔	CSRm 压缩腔
腔体加载类型	铁氧体加载	合金加载 (FINEMET-FT-1M)
总长/m	3.0	0.98
频率范围/MHz	0.24—1.81	1.15
高频电压/kV	7	40(单个腔体)
脉冲持续/ns	连续	50
占空比(%)	23.5	0.05
峰值功率/kW	20	500
平均功率/kW	3.2	0.05
分路阻抗/kΩ	2.0(0.45 MHz)	0.695(1.15 MHz)

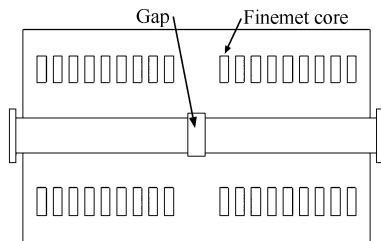


图 1 高频压缩腔 MAFIA 模拟图

使用 MAFIA 对此高频压缩腔进行模拟的结果显示, 此高频压缩腔的谐振频率为 1.15 MHz。用 MAFIA 软件不仅可以对需要的腔体形状、谐振频率进行模拟计算, 同样也可以通过谐振频率 f_r , 特定模式的平均储能 w 和在一个周期中的平均功率损失 p 等参数来间接计算出腔体的 Q 值, 计算结果 ($Q=1.2$) 虽然同理论计算值 ($Q=0.36$) 有一定的差别, 但是同样可以反映出此类高频腔具有较低 Q 值的特性, 满足了重离子束流较宽工作频率范围的要求。

4 结论

CSR 非绝热压缩腔是一种新型的高频腔, 相比铁氧体加载的高频腔, 它采用新型软磁合金 FINEMET 材料对腔体进行加载。国外一些加速器装置上已经对其特性进行了大量的研究和应用, 对其高频特性已经积累了大量的物理数据。本文介绍了软磁合金 FT-1M 环的电磁特性以及利用其加载的高频纵向束团非绝热压缩腔的工作原理, 利用 MAFIA 进行了相关的计算和模拟。计算和模拟结果表明, 此类型的纵向束团压缩腔可以得到高的电场梯度, 较低的 Q 值能够满足重离子束流较宽工作频率的要求, 因此, 这种类型的腔体保证了对重离子束团进行非绝热压缩的要求, FT-1M 加载的一定形状的 CSR 纵向束团压缩腔可以将 CSRm 中能量为 250 MeV/u, 初始重离子束团脉冲长度为 200 ns 的 $^{238}\text{U}^{72+}$ 离子束团压缩成 50 ns 的短脉冲离子束团。CSR 的建成出束, 为重离子束团非绝热压缩腔的研究发展提供了前所未有的条件, 同时为高能密度/等离子体物理科学的研究发展提供了新的平台。

参考文献 (References):

- [1] Xia Jiawen, Zhan Wenlong, Wei Baowen, *et al.* Nucl Instr and Meth, 2002, A488: 11.
- [2] Stowe S. Nucl Instr and Meth, 1998, A415: 61.
- [3] Blasche K. Proceedings of the 6th EPAC, Stockholm:1998, 1347.
- [4] Lund S M, Boine-Frankenheim O, Franchetti G, *et al.* PAC 99, New York: 1999, 1785.
- [5] Zhao Yangtao, Xiao Guoqing, Xu Hushan, *et al.* Nucl Instr and Mech, 2009, B267: 163.
- [6] Liu Wei. Investigation of Longitudinal Motion in CSR. Lanzhou, Institute of Modern Physics, CAS, 2005, 7 (in Chinese).
(刘伟. CSR 纵向运动研究(博士学位论文), 兰州: 中国科学院近代物理研究所, 2005, 7.)
- [7] Spiller P, Blasche K, Boine-Frankenheim O, *et al.* Particle Accelerator Conference 99, 1999, 3: 1788.
- [8] Ng K Y, Qian Z B. Particle Accelerator Conference, New York: 1999, 872.
- [9] Mori Y, Fujieda M, Koba K, *et al.* EPAC98, Storckholm: 1998, 299-301.

Study of CSR Longitudinal Bunch Compression Cavity^{*}

YIN Da-yu^{1, 2}, LIU Yong^{1, #}, XIE Qing-chun³, LI Peng^{1, 2}

(1 *Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;*

2 *Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;*

3 *College of Computer and Communication, Hunan University, Changsha 410082, China*)

Abstract: The scheme of longitudinal bunch compression cavity for the Cooling Storage Ring(CSR) is an important issue. Plasma physics experiments require high density heavy ion beam and short pulsed bunch, which can be produced by non-adiabatic compression of bunch implemented by a fast compression with 90° rotation in the longitudinal phase space. The phase space rotation in fast compression is initiated by a fast jump of the RF-voltage amplitude. For this purpose, the CSR longitudinal bunch compression cavity, loaded with FINEMET-FT-1M is studied and simulated with MAFIA code. In this paper, the CSR longitudinal bunch compression cavity is simulated and the initial bunch length of $^{238}\text{U}^{72+}$ with 250 MeV/u will be compressed from 200 ns to 50 ns. The construction and RF properties of the CSR longitudinal bunch compression cavity are simulated and calculated also with MAFIA code. The operation frequency of the cavity is 1.15 MHz with peak voltage of 80 kV, and the cavity can be used to compress heavy ions in the CSR.

Key words: longitudinal bunch compression cavity; high permeability; FINEMET magnetic alloy; MAFIA code

* **Received date:** 16 Feb. 2009; **Revised date:** 9 Mar. 2009

* **Foundation item:** National Natural Science Foundation of China(10635090)

Corresponding author: Liu Yong, E-mail: y.liu@impcas.ac.cn