

CSR ns 级重离子束动力学研究

殷达钰^{1,2}, 刘勇¹, 夏佳文¹, 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)

摘要:采用束团在纵向相空间快速旋转的非绝热压缩方法研究了在兰州重离子加速器冷却储存环(HIRFL-CSR)上获取高能 ns 量级短脉冲重离子束的可行性, 利用 K-V 包络方程对能量为 250 MeV/u、初始纵向束团长度为 200 ns、初始动量分散为 5×10^{-4} 的 $^{238}\text{U}^{72+}$ 离子束团的非绝热压缩过程进行了束流动力学模拟, 给出了在束团压缩过程中束流相关参数的变化。结果表明, 在 CSR 上可取得最短为 16 ns 长度的 $^{238}\text{U}^{72+}$ 离子束团, 可满足用于高能量密度物理研究的 50 ns 束团长度的要求。

关键词:冷却储存环; ns 级重离子束; 包络方程; 束团非绝热压缩

中图分类号: TL501.5

文献标志码: A

文章编号: 1000-6931(2010)12-1409-05

Dynamics Study of Attaining Heavy Ion Beam With a Scale of Nanosecond Pulse Length in CSR

YIN Da-yu^{1,2}, LIU Yong¹, XIA Jia-wen¹, LI Peng^{1,2}

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

2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The feasibility of attaining short pulse duration heavy ion beam with a scale of nanosecond pulse length was studied in the Heavy Ion Research Facility in Lanzhou—Cooling Storage Ring (HIRFL-CSR), such heavy ion beam can be produced by non-adiabatic compression, and it is implemented by a fast rotation in the longitudinal phase space. In this paper, the bunch compression beam dynamics of $^{238}\text{U}^{72+}$ which the energy is 250 MeV/u, initial bunch pulse duration is 200 ns, and the initial momentum spread is 5×10^{-4} was computed with K-V envelope model, and the possible beam parameters are presented during bunch compression. The short $^{238}\text{U}^{72+}$ bunch of 16 ns is got which can satisfy with the research of high energy density physics.

Key words: cooling storage ring; heavy ion beam with a nanosecond pulse length; envelope equation; bunch non-adiabatic compression

兰州重离子加速器冷却储存环(HIRFL-CSR)^[1]是一个多用途、多功能的双冷却储存环

加速器系统。从离子源引出的重离子束流经过扇聚焦回旋加速器(SFC)和分离扇回旋加速器

收稿日期: 2009-11-03; 修回日期: 2010-01-03

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10635090, 10905082)

作者简介: 殷达钰(1978—), 男, 甘肃金塔人, 助理研究员, 博士研究生, 重离子加速器物理专业

(SSC)预加速后注入 CSR 而得到更大能量的加速。HIRFL-CSR 可加速从 C 到 U 的所有离子,它的建成使得重离子研究能域和束流品质有了明显提高,同时也为更高流强、更高品质短脉冲高能重离子束的获得提供了必要条件,加快了一些国际重点基础研究及应用研究的发展,如短寿命核素质量测量^[2]、重离子束深层治癌^[3],同时也为一些国际前沿研究领域,如高能量密度物理^[4]基础研究、热密度物质^[5]和重离子驱动的惯性约束核聚变^[6]等提供了新的研究平台。利用重离子束流对高能量密度物理基础研究的基本条件是将高功率、高流强、小横截面尺寸和 ns 级短脉冲重离子束流能量最大化地沉积在实验物体中。目前,在 CSR 上取得的重离子束流由于其脉冲时间在百 ns 量级^[7],远远长于用于高能量密度基础研究的 ns 量级,因此,必须对其进行纵向压缩。基于这个原因,本工作研究在 CSR 上获取高能 ns 量级重离子束的可行性,并利用 K-V 包络方程对²³⁸U⁷²⁺离子束团的纵向非绝热压缩过程进行动力学模拟,以得到实现束团非绝热压缩的条件、影响束团非绝热压缩效率的因素、束团非绝热压缩可达到的最短值以及束团达到最短值所需的时间。

1 束团非绝热压缩基本原理

获得短脉冲重离子束团通常有以下两种方法:1) 采用高频电场缓慢上升的绝热(adiabatic)捕获方法,这种方法可得到与纵向高频电场相匹配的束团,通过绝热捕获后得到的最终束团长度大约与高频电压的 4 次方根成反比;2) 束团非绝热(non-adiabatic)压缩^[8],即束团在其纵向相空间得到 90° 的旋转,束团在纵向相空间的旋转由高频电压幅度的快速上升所引起。结合世界其他国家,如德国^[9]、日本^[10]和美国等一些加速器中心开展的纵向束团压缩研究经验,决定采用束团非绝热压缩,它是一种经济且非常有效的方法,与绝热捕获过程不同的是,束团在纵向相空间的旋转压缩要求的高频电压上升时间应尽量快,需短于同步振荡周期。

CSR 中进行束团非绝热压缩可分为两个过程:一是对经过 CSR 加速后束团的绝热俘获过程,在此过程中,束团在高频电压作用下在纵

向相空间进行重新俘获,为使俘获过程中的绝大多数粒子不损失,须采用绝热俘获,即俘获时间足够长,应远大于粒子进行同步振荡的周期,使得束团能与相稳区达到很好匹配。但另一方面,从粒子储存寿命及运行周期考虑,俘获时间又不可太长,否则,将造成粒子的损失。因此,必须选取合适的俘获时间。经理论计算和模拟,在束团绝热俘获过程中,俘获电压从 $V_0 = 20$ V 缓慢上升到 $V_i = 5$ kV, 上升时间约为 10 ms,俘获效率可达 70% 以上。另一个更加重要的过程是束团的非绝热压缩。假设重离子束团在绝热俘获后感受到的高频电压幅度为 V_i , 压缩所需的最终高频电压幅度为 V_f , 加速后束团动量分散为 $\Delta p/p_0$, 则束团非绝热压缩和束团非绝热压缩束团长度比率公式分别为:

$$l_f \sim \sqrt{\frac{A}{q} \cdot \frac{V_i}{V_f} \cdot \frac{\Delta p}{p_0}} \quad (1)$$

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

其中: A 为离子质量数; q 为离子电荷态; l_i 和 l_f 分别为压缩前后的束团长度。

从上式可看出,最终束团长度正比于其初始 $\Delta p/p_0$ 。CSR 是具有电子冷却装置^[11]的同步加速器,电子冷却方法由 G. Budker 于 20 世纪 60 年代提出,其基本原理是以相同平均速度运动的电子束与离子束通过库仑作用将相对较热的离子束的能量转移到较冷的电子束,从而大幅降低离子束的横向发射度和动量分散,最终使得加速后重离子束团的动量分散也得到很大程度的降低,且由于粒子在 CSR 中多次穿过高频腔,CSR 对束团纵向操作因此有着极大的优越性和便利性。另外,从上式不难看出,当被压缩束团俘获高频电压一定时,离子束团最终长度约与最终高频电压的平方根成反比。因此,欲获得持续时间足够短的离子束团,则须使被压缩离子束团受到足够高的高频电压。目前,采用铁氧体材料加载的用于重离子束加速的高频腔由于具有较低的电场梯度,在 CSR 有限空间内不能得到满足于束团非绝热压缩较高高频电压的要求,因此,须研究一种采用新型软磁合金材料加载的高梯度高频腔^[12-13],以满足束团非绝热压缩的要求。

以 CSR 加速后的²³⁸U⁷²⁺离子束流为研究

对象,因受 CSR 磁钢度的限制,取 $^{238}\text{U}^{72+}$ 离子在 CSR 储存环中的加速能量为 250 MeV/u,加速后的 $^{238}\text{U}^{72+}$ 束团脉冲长度约为其回旋周期的 1/4,即 200 ns,则远不能满足用于高能量密度物理 50 ns 的要求。根据束团非绝热压缩理论计算以及国外经验,绝热俘获高频电压幅度 $V_i=5\text{ kV}$ 必须在 10 μs 时间内呈抛物线形达到最终高频电压 $V_f=80\text{ kV}$ 。高频电压上升曲线如图 1 所示。在高频电压幅度达到 80 kV 后的 23 μs 时间内,电压幅度保持最大值不变。由于同步振荡频率正比于高频电压的平方根,因此,同步振荡频率会随着高频电压的变化呈现出如图 2 所示的变化。表 1 所列为 $^{238}\text{U}^{72+}$ 离子加速到 250 MeV/u 后的束流参数以及非绝热压缩高频电压参数。

表 1 用于束团压缩的束流参数

Table 1 Beam parameters for bunch compression in CSR

参数	量值
离子能量, MeV/u	250
粒子数	2×10^9
初始束团长度, ns	200
束团初始动量分散, %	5×10^{-4}
高频俘获电压, kV	5
最终高频电压, kV	80
最终束团长度, ns	50

取纵向束团半宽度为 r_z ,则 K-V 包络方程可写为如下形式:

$$r'_z + k_{0s}^2 r_z - \frac{K_{\parallel}}{r_z^2} - \frac{\epsilon_{\parallel}^2}{r_z^3} = 0 \quad (3)$$

其中: r'_z 为 r_z 沿环运动距离 z 的导数; k_{0s} 和 K_{\parallel} 分别为纵向振荡波数和束流导流系数; ϵ_{\parallel} 为均方根发射度。

k_{0s} 的表达式为:

$$k_{0s}^2 = qVh |\eta| / 2\pi R^2 \gamma_s \beta_s^2 mc^2 \quad (4)$$

其中: q 、 V 、 h 、 η 、 R 分别为离子电荷态、束团压缩所需高频电压、束流加速谐波数、滑相因子和 CSR 环平均半径; β_s 、 γ_s 为相对论因子。

将各量数值代入式(4),可求得纵向振荡波数的平方 $k_{0s}^2 = 2.854 \times 10^{-9}$ 。

K_{\parallel} 的表达式为:

$$K_{\parallel} = 3gq^2 N |\eta| / 4\pi\epsilon_0 2\gamma_s^3 \beta_s^2 mc^2 \quad (5)$$

其中: \bar{g} 为几何因子 $g = 1/2 + 2\ln \frac{r_p}{r_b}$ 的平均值, r_p 、 r_b 分别为束流管道半径和束流横向包络半径; N 、 ϵ_0 分别为束团中的粒子数和真空中介电常数。

将各量数值代入式(5),可求得几何因子平均值为 3.5。

ϵ_{\parallel} 的表达式为:

$$\epsilon_{\parallel} = |\eta| r_z \Delta p / p \quad (6)$$

其中: $\Delta p / p$ 为束团压缩初始动量分散。

ϵ_{\parallel} 在束团纵向非绝热压缩过程中保持为常数。在此过程中,纵向束团半径将随着动量分散的增加而减小,因此,对于一定长度的 r_z , $\Delta p / p$ 是一定值。对于 250 MeV/u 的 $^{238}\text{U}^{72+}$ 离子束,取压缩前初始束团纵向半径 $r_z =$

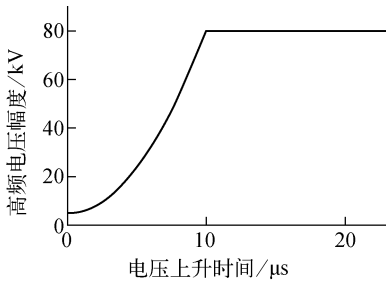


图 1 高频电压幅度随时间的上升曲线

Fig. 1 RF voltage as a function of time

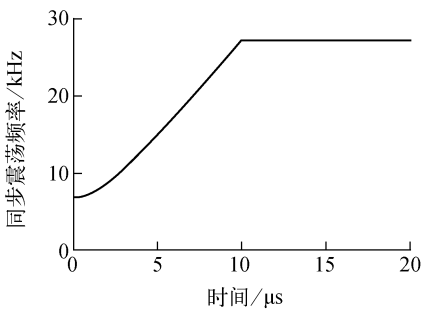


图 2 同步振荡频率随时间的变化曲线

Fig. 2 Synchrotron frequency as a function of time

2 K-V 包络方程模拟 CSR 束团非绝热压缩束流动力学

CSR 中加速后束团的非绝热压缩过程可通过 K-V 包络方程^[14]进行模拟。根据表 1 所列数据,加速后的 $^{238}\text{U}^{72+}$ 离子纵向初始束团长度为 200 ns。假设纵向粒子分布为高斯分布,

100 ns, 即 26.8 m, $\Delta p/p = 5 \times 10^{-4}$, $\eta = 0.565$, 将数值代入式(6)则可求得 $\epsilon_{\parallel} = 0.057$, $\epsilon_{\parallel}^2 = 3.249 \times 10^{-3}$ 。基于式(6), 束团压缩的极限值在一定程度上取决于 CSR 储存环的最大动量接受度。根据表 1 所列数据, CSR 储存环的最大动量接受度为 1.25%。因此, 在理想情况下, 满足上述束流参数的 $^{238}\text{U}^{72+}$ 离子束团, 经非绝热压缩可得到达到的纵向束团极限半长度为 8 ns。

对于满足式(4)、(5)和(6)的 K-V 包络方程进行数值计算。假设纵向束团呈图 3 所示的高斯分布, 横坐标为纵向束团长度, 纵坐标为束团离子横向分布, 计算后可得到如图 4 所示的纵向束团非绝热压缩动力学。

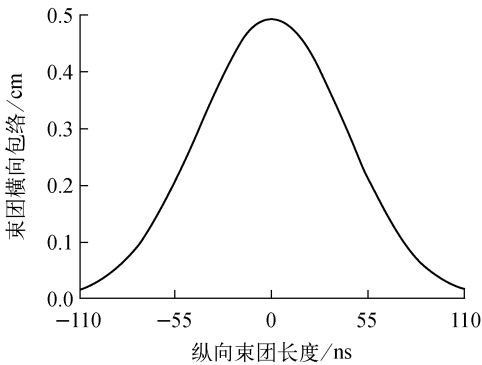


图 3 $^{238}\text{U}^{72+}$ 束团横向剖面沿纵向的分布

Fig. 3 Beam profile of $^{238}\text{U}^{72+}$

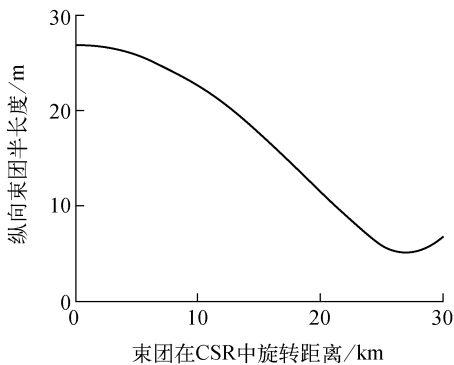


图 4 $^{238}\text{U}^{72+}$ 束团纵向半长度随旋转距离的变化

Fig. 4 Envelope model of $^{238}\text{U}^{72+}$ bunch compression

从图 4 可清楚地看出, $^{238}\text{U}^{72+}$ 离子束团随着在 CSR 环中的旋转, 其纵向束团半长度减小, 当束团旋转 26.95 km, 即 167.4 圈时达到最短值, 此时的纵向束团长度为 10 m, 也即加

速后的束团经束团非绝热压缩后, 束团脉冲长度可达 38 ns, 最大压缩率为 5.4。

另外, 经模拟, 对于初始纵向束团半长度为 200 ns 的 $^{238}\text{U}^{72+}$ 离子束团, 当真空管道尺寸确定时, 束团压缩率还取决于束团横向半径。因此, 欲获得极短脉冲束团长度, 在一定程度上可通过减小束团横向尺寸来实现。

通过束团非绝热压缩可将全环累积的中能及高能重离子束流压缩到 ns 量级的脉冲长度, 实现瞬间 A 量级离子电流和 GW 量级的功率, 这就为极端条件下开展高能量密度实验提供了条件。

3 结论

利用重离子束流因受高频电压的快速上升而导致在其纵向相空间快速旋转的非绝热压缩方法, 研究了在 CSR 上取得 ns 级重离子束流动力学, 使用 K-V 包络方程对能量为 250 MeV/u、初始束团长度为 200 ns、初始动量分散为 5×10^{-4} 的 $^{238}\text{U}^{72+}$ 离子束流动力学过程进行了模拟计算。结果表明, 在 CSR 上可获得用于高能量密度物理基础研究所要求的 50 ns 的短脉冲重离子束流, 用于束团非绝热压缩需要的高频电压幅度为 80 kV。这一结果为高梯度高频腔的研制提供了必要的理论基础和参数要求, 论证了 CSR 为高能量密度物理基础研究、热密度物质和重离子驱动的惯性约束核聚变等离子体物理等前沿科学研究提供新的实验平台的可行性。

参考文献:

- [1] XIA Jiawen, ZHAN Wenlong, WEI Baowen, et al. HIRFL-CSR complex[J]. Chinese Physics C, 2009, 33(8): 804-810.
- [2] HAUSMANN M, STADLMANN J, ATTAL-LAH F, et al. Isochronous mass measurements of hot exotic nuclei [J]. Hyperfine Interactions, 2001, 132: 291-297.
- [3] LIU Xinguo, LI Qiang, WU Qingfeng, et al. Experimental verification of therapeutic dose for the superficially-placed tumor radiotherapy with heavy ions at HIRFL[J]. Chinese Physics C, 2009, 33(2): 151-155.
- [4] ZHAO Yongtao, XIAO Guoqing, XU Hushan,

- et al. An outlook of heavy ion driven plasma research at IMP-Lanzhou[J]. Nucl Instrum Methods B, 2009, 267: 163-166.
- [5] SEFKOW A B, DAVIDSON P A, EFTHIMION P C, et al. Extreme compression of heavy-ion beam pulses: Experiments and modeling[C]// Proceedings of the 2007 PAC. USA: [s. n.], 2007: 2 030-2 034.
- [6] CELATA C M. Overview of the heavy ion fusion program [C] // Proceedings of 2000 LINAC. USA: [s. n.], 2000: 668-671.
- [7] 中国物理学会. 中国物理学会 2003 年秋季学术会议论文集[C]. 合肥:中国物理学会,2003.
- [8] SPILLER P, BLASCHE K, BOINE-FRANKENHEIM O, et al. Generation of high power heavy ion beams at GSI[C]// Proceedings of the 1999 PAC. USA: [s. n.], 1999: 1 788-1 790.
- [9] BLASCHE K, BOINE-FRANKENHEIM O, EICKHOFF H, et al. Bunch compression in the heavy ion synchrotron SIS at GSI[C]// Proceedings of the 6th EPAC. Stockholm City, Sweden: [s. n.], 1998: 1 347-1 349.
- [10] KIKUCHI T, LUND S M, KATAYAMA T, et al. Possible parameters for bunch compression in a ring in future RIKEN projects[C]// Proceedings of the APAC 2004. Gyeongju, Korea: [s. n.], 2004: 113-115.
- [11] 杨晓东, PARKHOMCHUK V V. HIRFL-CSR 实验环电子冷却装置参数优化[J]. 强激光与粒子束, 2000, 12(6): 771-775.
- YANG Xiaodong, PARKHOMCHUK V V. Parameters optimization of HIRFL-CSR experiment ring electron cooling device [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2000, 12(6): 771-775 (in Chinese).
- [12] SPILLER P, AHRENS J, BLASCHE K, et al. A new high-intensity synchrotron SIS100 with strong bunch compression for GSI[C]// Proceedings of the 2001 PAC. USA: [s. n.], 2001: 3 278-3 280.
- [13] 殷达钰, 刘勇, 解庆春, 等. CSR 纵向束团压缩腔研究[J]. 原子核物理评论, 2009, 26(3): 198-202.
- YIN Dayu, LIU Yong, XIE Qingchun, et al. Study of CSR longitudinal bunch compression cavity[J]. Nuclear Physics Review, 2009, 26(3): 198-202 (in Chinese).
- [14] HARRIS J R, VALFELLS A, BEAUDOIN B, et al. Initial studies of longitudinal dynamics of UNER[C] // Proceedings of the 2003 PAC. USA: [s. n.], 2003: 2 312-2 314.