

合肥光源储存环的离子俘获 与直流离子清洗

李永军 金玉明 李为民 孙葆根
殷立新 刘祖平 高辉

(中国科学技术大学国家同步辐射实验室 合肥 230029)

摘要 研究了合肥光源(HLS)电子储存环中离子产生、俘获的过程,离子对束流的影响,直流离子清洗的作用及清洗效果.为光源的高效率的运行提供了理论指导及实验依据.

关键词 离子俘获 直流清洗电极 电子储存环

1 引言

电子储存环中,束流与残余气体相互作用使气体分子电离成正离子和自由电子.其中带正电的离子由于受到束流势阱的作用,在一定的条件下被束流所俘获,在束流轨道附近作稳定的振荡.这些被俘获的离子在束流轨道附近的积累会引起束流发射度增加,局部真空度变坏,甚至使束流不稳定等各种负效应.因此离子清洗对保证储存环的稳定运行是必要的.在合肥光源的日常运行和机器研究过程中,都观察到由于离子俘获引起的束流不稳定性的发生,通过利用储存环中安装的直流和高频两种清洗电极有效地克服离子俘获效应.本文从理论及实验上研究了合肥光源储存环中离子产生及俘获的过程,直流清洗电极的清洗机理和清洗效果.

2 离子的产生和俘获

2.1 离子的产生

相对论性的电子束($\beta \approx 1$)经过气体时,气体分子的电离率为^[1,2]

$$N_i = \frac{N_e}{\tau} = N_e \sum_i \frac{1}{\tau_i} \text{ 和 } R_i = \frac{1}{\tau_i} = d_i \sigma_i c = \frac{P_i}{kT} \sigma_i c \quad (1)$$

其中, N_i (s^{-1}) 为单位时间内产生的离子数目, N_e 为束流电子总数, $R_i = \frac{1}{\tau_i}$ (s^{-1}) 为各种气体分子的电离率, τ_i (s) 为一个电子产生一个离子所需时间, d_i (m^{-3}) 为气体分子的密度, p_i (Pa) 为气体的分压强, $k = 1.381 \times 10^{-23} J \cdot K^{-1}$ 为 Boltzmann 常数, $T = 300K$ 为室温, $c = 2.9979 \times 10^8 m \cdot s^{-1}$ 为光速, σ_i (m^2) 为气体分子的电离截面, 由下式给出^[1]

$$\sigma_i = 4\pi \left(\frac{\hbar}{m_e c} \right)^2 \left[c_1 \left(\beta^2 \ln \frac{\beta^2}{1 - \beta^2} - 1 \right) + c_2 \beta^2 \right], \quad (2)$$

式中 $4\pi \left(\frac{\hbar}{m_e c} \right)^2 = 1.874 \times 10^{-24} m^2$, c_1 和 c_2 是与气体分子种类有关的常数, $\beta = \frac{v}{c}$ 为束流相对速度. HLS 储存环中几种主要残余气体分子的分压强、电离截面和电离率见表 1. 当环中 $I = 100mA$ 时, 单位时间产生的离子数为 $N_i = 1.38 \times 10^{11} \sum_i R_i = 5.1 \times 10^{11} (s^{-1})$, 其中主要是 CO^+ 离子.

表 1 800MeV 时, HLS 环中几种主要残余气体分子的分压强、电离截面和电离率

	c_1	c_2	σ_i/m^2	p_i/Pa	R_i/s^{-1}
H ₂	0.5	8.1	2.80×10^{-23}	8.76×10^{-8}	0.203
H ₂ O	3.2	32.3	1.43×10^{-22}	1.60×10^{-8}	0.951
CO	3.7	35.1	1.60×10^{-22}	2.05×10^{-7}	2.144
CO ₂	5.75	55.9	2.53×10^{-22}	2.21×10^{-8}	0.409

2.2 束流产生的电场

一般认为, 束流中电荷在横向是高斯分布的

$$\rho(x, y) = \frac{n_e e}{2\pi\sigma_x\sigma_y} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma_x^2} - \frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right),$$

其中, n_e (m^{-3}) 为纵向电荷线密度, $\sigma_{x,y}$ (m) 是束团的均方根尺寸, e (C) 为单位电荷电量. 由束流产生的电场为^[3]

$$E_x - iE_y = -\frac{in_e e}{2\epsilon_0 \sqrt{2\pi(\sigma_x^2 - \sigma_y^2)}} \times \left[w\left(\frac{x+iy}{\sqrt{2(\sigma_x^2 - \sigma_y^2)}}\right) - \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma_x^2} - \frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right) w\left(\frac{\frac{x\sigma_y}{\sigma_x} + i\frac{y\sigma_x}{\sigma_y}}{\sqrt{2(\sigma_x^2 - \sigma_y^2)}}\right) \right]$$

式中 $w(z) = e^{-z^2} \left[1 + \frac{2i}{\sqrt{\pi}} \int_0^z e^{t^2} dt \right]$ 为复误差函数^[4], $\epsilon_0 = 0.88542 \times 10^{-11} F \cdot m^{-1}$ 为真空介电常数. 根据(4)式计算出沿束团中心的 x, y 方向上的电场强度分布如图 1 实线所示, 在束团内部, 电场可以线性近似描述为

$$E_{x,y} = \frac{n_e e}{2\pi\epsilon_0\sigma_{x,y}(\sigma_x + \sigma_y)}(x, y) \quad (5)$$

如图 1 中的虚线所示.

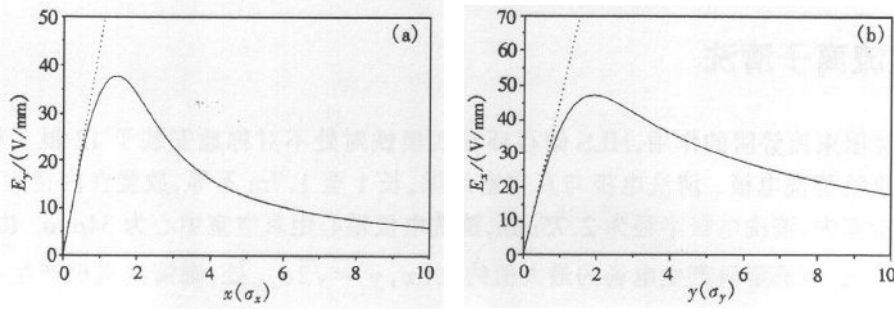


图1 (a)沿 x 轴各点的电场强度;(b)沿 y 轴各点的电场强度
 $\sigma_x = 1.0\text{mm}, \sigma_y = 0.3\text{mm}$.

2.3 离子的俘获和引起的工作点漂移

对于束团型束流,离子的纵向运动相对于束流而言可以忽略,即认为离子在纵向是静止的.当束团经过时,带正电荷的离子受到束团的聚集作用,离子相当于在聚焦元件中运动;两束团之间,离子则不受力,相当于在自由段中运动.因此,离子在横向上的运动可以看作是在以时间为自由变量的FO结构中运动.由线性理论,当离子的质量数满足^[1]

$$A > A_c = \frac{IC^2 r_p}{2h^2 e c \sigma_{x,y} (\sigma_x + \sigma_y)} \quad (6)$$

时,离子的运动是稳定的,被束流所俘获,在轨道附近积累.式中 A_c 定义为临界质量, $I(A)$ 是流强, $C(m)$ 是环周长, $r_p = 1.53 \times 10^{-18} \text{m}$ 为质子的经典半径, h 为束团数目. HLS 全环均匀填充时, $A_c \ll 1$, 这意味着束流能俘获各种离子.当俘获的离子在束流轨道附近积累到一定程度时,会在各种机制下不断丢失¹⁾.离子产生和丢失达到动态平衡时,储存环中的离子就会有一个较固定数目.定义中性化系数为

$$\eta_i = \frac{N_i}{N_e} = \frac{\oint n_i ds}{\oint n_e ds} \quad (7)$$

如果认为被束流俘获的离子云与束团具有同样的横向尺寸,则离子云空间电荷分布具有的电四极分量引起的束流横向振荡频率(工作点)的漂移为²⁾

$$\Delta \nu_{x,y} \approx \frac{R^2 r_e}{\gamma e c \sigma_{x,y} (\sigma_x + \sigma_y) \nu_{x,y}} I \eta_i \quad (8)$$

式中 $R(m)$ 为环的平均半径, $r_e = 2.8179 \times 10^{-15} \text{m}$ 为电子经典半径, γ 为电子相对能量, $\nu_{x,y}$ 为储存环的工作点.

1) R. Z. Liu. Consideration on Ion Accumulation and Clearing in SPEAR. SSRL ACD-NOTE 25. 1984

2) P. Morton. Ion effects in the Damping Ring. SLAC CN-89. 1981

3 直流离子清洗

为克服束流势阱的作用, HLS 储存环在四极铁对处不对称地安装了 12 根 3 种不同规格的直流清洗电极. 清洗电极与真空室绝缘, 长 1 至 1.7m 不等, 放置在内径为 85mm 圆形真空室内, 清洗电极半径为 2.75mm, 清洗电极轴心距真空室中心为 34mm. 由(4)式和图 1 可见, 束流势阱产生电场的最大值约在 $(x, y) = \sqrt{2}\sigma_{x,y}$ 处, 则清洗电极产生的电场应满足^[2]

$$E_{dr} \geq E_{x,y}(\sqrt{2}\sigma_{x,y}) = \frac{I}{\sqrt{2}\pi c \epsilon_0 (\sigma_x + \sigma_y)} \quad (9)$$

由上式则可计算出所需的最低清洗电压为 $V_{min} \approx E_{dr} \cdot D$, $D = 76.5\text{mm}$ 为清洗电极距真空室上方内壁的距离. 对于 HLS 储存环束团的典型参数, $\sigma_x = 1.0\text{mm}$, $\sigma_y = 0.3\text{mm}$. 若流强为 $I = 70\text{mA}$ 时, $V_{min} \approx 350\text{V}$.

4 实验结果

4.1 离子流的测量及其与清洗电压的关系

在清洗电极上加一相对于地为负的电压, 则离子会在清洗电场的作用下克服束流势阱向清洗电极运动, 从而达到清洗离子的目的. 离子产生的速率与束流流强、气体分子的分压强等因素有关, 一定条件下离子产生率是固定的, 只要清洗电压能满足(9)式的条件, 离子就可被有效地清除. 通过在直流清洗电极的末端安装一微电流测量系统来研究清洗电压与离子流的关系, 从而决定高效率清洗所需要清洗电压. 1998 年 12 月 21 日, 实验测量了在能量为 800MeV, 流强为 70mA, 45 个束团均匀填充时, 离子流与清洗电压的关系, 实验结果如图 2 所示. 从图 2 可以看出, 当清洗电压为 350—400V 时, 产生的离子基本上就可全部被清洗, 继续增加清洗电压时离子流也不随之增加, 这与用(9)式计算的结果符合的很好. 值得指出的是, 离子流测量的结果远比(1)式计算的结果大, 这可能是由于同步光电离和高电离态的离子形成导致的.

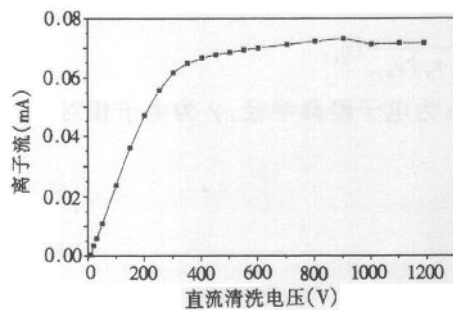


图 2 离子流与清洗电压的关系

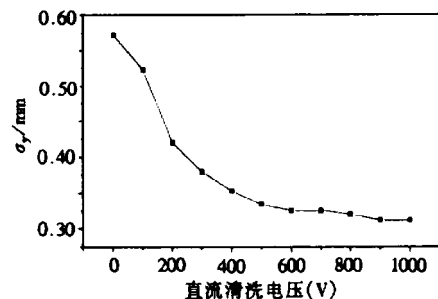


图 3 束团尺寸与清洗电压的关系

4.2 束团横向尺寸的变化

束流和离子云横向振荡的耦合,会导致束流发射度的增加;甚至是束流不稳定性的发生^[1].图3为1999年2月5日,实验测量在能量为800MeV,流强为117mA,45个束团均匀填充时,竖直方向束团尺寸随清洗电压的变化情况.束团尺寸由HLS束团截面测量系统得到^[5].从中可以看出,直流清洗电极能有效地清洗离子,从而克服由于离子引起的束流发射度的增加而导致的光源亮度的降低.从图3还可见俘获的离子会使束团尺寸在竖直方向增加近一倍,最低的清洗电压为500—600V左右,根据(9)式计算,此时 $V_{\min} \approx 580V$,两者符合的很好.

4.3 工作点的漂移的测量和中性化系数的计算

直流清洗电极电场和被束流俘获的离子都会引起的储存环工作点的漂移.由(8)式可见,由俘获的离子引起的工作点的漂移与流强呈正比关系,即 $\Delta v_i \propto I$;而直流清洗电极引起的工作点的漂移^[6]只与清洗电极的位置和结构,清洗电压等因素有关,与流强则无关.当流强很小时, $\Delta v_i \approx 0$,此时测量出的工作点与离子无关,但包括清洗电极电场的贡献.1999年1月22日实验测量了在能量为800MeV,低流强($I = 5.2mA$),45个束团均匀填充时,清洗电极加不同电压时储存环的工作点,作为没有离子俘获情形时的工作点;在同样机器条件下测量了流强为 $I = 56mA$,不同清洗电压情况下储存环的工作点.由此可以得到在流强为 I 时,由离子引起的工作点的漂移与清洗电压的关系 $\Delta v_i(V_{dr})$,进而可以根据(8)式计算中性化系数 η_i .图4为中性化系数与清洗电压的关系.可见,随着清洗电压增加到300V,中性化系数由未经清洗时的0.35%降低到0.15%,这与另外两次实验,离子流和束团横向尺寸分别与清洗电压的关系的测量结果也是吻合的,与根据(9)式的计算结果也是一致的.因为实验时束流流强较低,由离子引起的HLS工作点的漂移也很小.

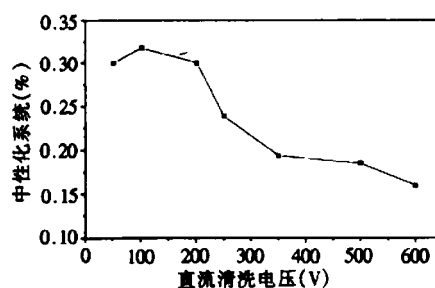


图4 中性化系数与清洗电压的关系

5 结论

对于HLS储存环而言,离子俘获会对束流产生较大的影响,特别是束团竖直方向尺寸的增加而导致光源亮度的降低.环中现有的直流离子清洗电极能较有效地清洗离子的同时,也对束流产生一定的影响.由于安装直流清洗电极的真空室只占全环的30%,这种清洗方式只能对环中的离子实现部分清洗.对于机器现在的运行状态(流强为75—150mA),选择350—700V左右的清洗电压即可达到有效的清洗效果.实验室二期工程后,当光源运行在高亮度模式,或在横向耦合得到校正时,应适当地增加清洗电压.

在课题研究与张闻教授(高能所),裴元吉教授,郑曙昕博士(清华大学)、王琳进行了有益的探讨;在机器研究过程中得到 HLS 机器运行人员的大力协助和支持,特此致谢。

参考文献 (References)

- 1 Baconnier Y. Neutralization of Accelerator Beams by Ionization of Residual Gas. In: P. Bryant, S. Turner. CERN 85—19, Vol. 1. Geneva:1985. 271—273
- 2 Eva S. Bozoki, Henry Halama. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, 1991, A307: 156—166
- 3 Eberhard Keil. Beam-Beam Dynamics. In: S. Turner CERN 95-06, Vol. 1. Geneva: 1995. 539—540
- 4 Abramowitz M, Stegun I A. Handbook of Mathematical Functions. New York: Dover, 1965. 297
- 5 FANG ZhiGao et al. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, 1991, A370: 641—643
- 6 CHEN LongKang et al. Single Bunch Instabilities in HLS Ring. In: Weiren Chou et al. Proceedings of the workshop on Beam Instabilities in Storage Rings. Hefei: Press of University of Science and technology of China, 1994. 66—67

Ion Trapping and the DC Ions Clearing in HLS Ring

LI YongJun JIN YuMing LI WeiMin SUN BaoGen
YIN LiXin LIU ZuPing GAO Hui

(National Synchrotron Radiation Laboratory, University of Science and Technology of China, Hefei 230029, China)

Abstract The process of ion generation and trapping, trapped ion's influence on the beam, the DC clearing electrodes mechanism and clearing effect were investigated in HLS ring. Theoretical and experimental basis was provided for the efficient performance of the light source.

Key words ion trapping, DC clearing electrodes, electron storage ring