

BEPC II 中电子云密度的计算研究*

刘瑜冬¹⁾ 国智元 王九庆

(中国科学院高能物理研究所 北京 100039)

摘要 正电子储存环在多束团运行时有可能发生电子云不稳定性(EMI)。本文针对北京正负电子对撞机二期工程(BEPC II)的具体条件,区别于国外的研究编写发展了模拟计算程序,首次给出了前室型真空管道中电子云的聚集情况,定量计算了不同前室长度,不同二次电子产额作用下的电子云密度;通过模拟计算研究了在真空管道中放置清洗电极来降低电子云密度并改变密度分布以抑制不稳定性的可能性,为储存环中电子云不稳定的前沿科学研究和 BEPC II 工程设计提供了有意义的结果。

关键词 电子云不稳定性 二次电子产额 前室型真空管道 清洗电极

1 概述

正电子储存环中由于电子云聚集导致的束流不稳定性于 1989 年第一次在 KEK PF 中观测到,以后在 BEPC, KEKB, PEP II 等对撞机上都作了观测研究^[1-3]。K. Ohmi 等人利用等效尾场方法对此现象进行了解释和模拟计算^[4],发现电子云平衡密度的大小对不稳定性强弱有重要影响。因此为降低电子云密度,提出了多种不同抑制方法,如在真空管道内壁采用 TiN 镀膜以抑制二次电子产额;采用前室型(Antechamber)真空管道以降低直接光电子产额;以及外加螺线管场或清洗电极电场改变真空管道中的电子云分布,以降低束流管道中心电子云密度等。

BEPC II 设计中采用了前室型真空管道并在内壁镀 TiN 以降低电子产额。对于前室在降低电子云密度方面的作用,国外尚无定量的计算结果,因此我们编写发展了计算程序对不同长度前室对电子云密度的影响进行了模拟计算;并将清洗电极的模型包括到计算中去,定量地对清洗电极降低电子云密度方面的作用进行了准确计算。表 1 给出了 BEPC II 的设计参数。

表 1 BEPC II 设计参数

参数名称	符号	参数量
束流能量/GeV	E	1.89
储存环周长/m	C	237.53
每束流中束团数目	n_b	93
每个束团中粒子数	N_b	4.85×10^{10}
束团长度/cm	σ_l	1.5
发射度(水平/垂直)/(mm·mrad)	ϵ_x/ϵ_y	0.14/0.002
包络函数振荡波数(水平/垂直)	ν_x/ν_y	6.6/7.6
束团间距/m	L_{sep}	2.4

2 物理模型和程序计算过程

束流粒子在真空管道中运动,沿轨道切线方向发出同步光,单个粒子沿环运动一周所发射的光子总数 N_γ 为^[5]

$$N_\gamma = \frac{5\pi}{\sqrt{3}} \alpha \gamma, \quad (1)$$

α 是精细结构常数, γ 是相对论因子。光子打在管壁上被反射或吸收,渗入管道材料中的光子可能导致光电子发射。假设 N_0 个光子打在管壁上,有 N_{r0} 个光子反射,有 N_a 个光子被吸收,并产生 N_{e1} 个光

2003-09-26 收稿,2003-11-12 收修改稿

* 国家自然科学基金(10275079)资助

1)E-mail: liuyd@mail.ihep.ac.cn

电子,则定义反射系数为 $R = \frac{N_{\gamma 0}}{N_0}$, 初级光电子产额为 $Y = \frac{N_{e1}}{N_0}$; 假设被反射的光子多次反射后最终被全部吸收, 则 N_0 个光子在管道中产生光电子总数 N_e 为^[5]

$$N_e = YN_0(1 + R + R^2 + R^3 + \dots) = \frac{Y}{1-R}N_0 = Y'N_0, \quad (2)$$

Y' 定义为光电子产额. 因此, 一次光电子在管道中的产生并不是完全均匀的, 一部分是在某一点产生, 对应于初级光电子; 另一部分光电子是光子经多次反射后在一定分布下产生的. 光电子初始能量分布可以认为是高斯分布, 出射角度按 $\cos\theta$ (光电子的出射方向和界面法线的夹角) 方式变化^[4]. 在模拟程序中, 对于前室型真空管道有 99.5% 的同步光将入射在前室内, 这部分同步光产生的光电子集中在前室中, 只有少部分具有较大初始横向动能的光电子才能进入真空管道^[6].

光电子在束流电场作用后打到管壁上产生二次电子, 与能量和角度相关的二次电子产额 δ 为^[7]

$$\delta(E, \theta) = \delta_{\max} \cdot 1.11 \cdot \left(\frac{E}{E_{\max}}\right)^{-0.35} \cdot \left\{1 - \exp\left[-2.3 \cdot \left(\frac{E}{E_{\max}}\right)^{1.35}\right]\right\} / \cos\theta, \quad (3)$$

式中 θ 为光电子的入射角, E 为入射光电子能量, E_{\max} 为光电子垂直入射 ($\theta = 0$) 情况下最大二次电子产额 δ_{\max} 所对应的入射光电子能量. δ_{\max} 的取值与材料有很大的关系, PEP II 的 R. E. Kirby 和 F. K. King 对不同材料在不同束流能量和不同入射角度下的二次电子产额进行了详细的实验测量^[8], 结果表明金属铝经过束流轰击氧化后的最大二次电子产额为 $\delta_{\max} \approx 1.8$, $E_{\max} \approx 250\text{eV}$. 镀 TiN 后可以降低最大二次电子产额到 $\delta_{\max} \approx 1.066$. 二次电子能量分布可以认为是高斯分布, 出射角度在 3 个方向上随机. 电子在管道中受到的力为

$$\mathbf{F}_e = \mathbf{F}_p + \mathbf{F}_{\text{space}} + \mathbf{F}_c, \quad (4)$$

$\mathbf{F}_{\text{space}}$ 是电子之间的空间电荷力作用, 可以通过 PIC (particle in cell) 方法求解某一准静态条件下的 Poisson 方程得到空间电荷场; \mathbf{F}_c 是外场力作用, 计算中对应于放置清洗电极的电场力; \mathbf{F}_p 是由束流所施加的直接电场力作用, 计算束流电场的 Basseti-Erskine 公式为^[9]

$$E_x = \frac{Q}{2\epsilon_0 \sqrt{2\pi(\sigma_x^2 - \sigma_y^2)}} \text{Im}f(x, y), \quad (5)$$

$$E_y = \frac{Q}{2\epsilon_0 \sqrt{2\pi(\sigma_x^2 - \sigma_y^2)}} \text{Re}f(x, y), \quad (6)$$

$$f(x, y) = W\left(\frac{x + iy}{\sqrt{2(\sigma_x^2 - \sigma_y^2)}}\right) - \exp\left[-\frac{x^2}{2\sigma_x^2} + \frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right] W\left(\frac{x \frac{\sigma_y}{\sigma_x} + i \frac{\sigma_x}{\sigma_y}}{\sqrt{2(\sigma_x^2 - \sigma_y^2)}}\right), \quad (7)$$

这里 Q 是单个束团的电荷量, $\sigma_{x,y} = \sqrt{\epsilon_{x,y} \langle \beta_{x,y} \rangle}$, 是团横向尺寸, $W(x + iy)$ 为复误差函数.

模拟计算程序中应用的物理过程如下: 当束团通过单位长度的真空管道时, 首先计算在管道外壁和前室中产生一次光电子, 光电子数目用宏粒子代替; 然后计算这些宏粒子由于束团电场作用而导致的动量改变; 在连续两束团间隔中点处计算一次电子云的空间电荷场, 跟踪宏粒子在空间电荷力的作用下运动; 当光电子碰撞到管道壁后, 利用公式 (3) 计算产生的二次电子宏粒子; 依次计算每个束团通过后的宏粒子运动, 从而得到宏粒子的分布和平衡密度, 即电子云密度.

3 模拟计算结果

3.1 不同前室长度下的电子云密度模拟

模拟计算中采用如图 1 所示的前室型真空管道横截面, 模拟计算中改变前室长度, 从而研究不同长度下的电子云密度. 对于真空管道内壁镀膜作用, 根据文献[8], 在不镀 TiN 时取二次电子产额 SEY 为 1.8, 当镀了 TiN 后降低为 1.06, 以比较相同前室长度下镀膜对二次电子的作用. 计算结果中的中心电子云密度是指电子云范围在束流中心横向 $10\sigma_x$ 和 $10\sigma_y$ 的区域内的电子密度.

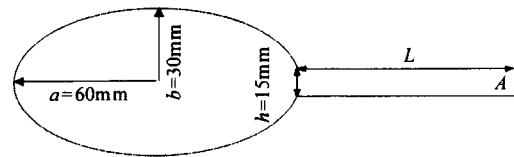


图 1 前室型真空管道横截面

图 2 和图 3 给出了不同长度前室下的中心电子云密度, 分别对应于有无 TiN 镀膜后的二次电子产额. 模拟计算结果表明, 随着前室长度的增加电子云中心平衡密度降低. 当前室长度增加到其高度的

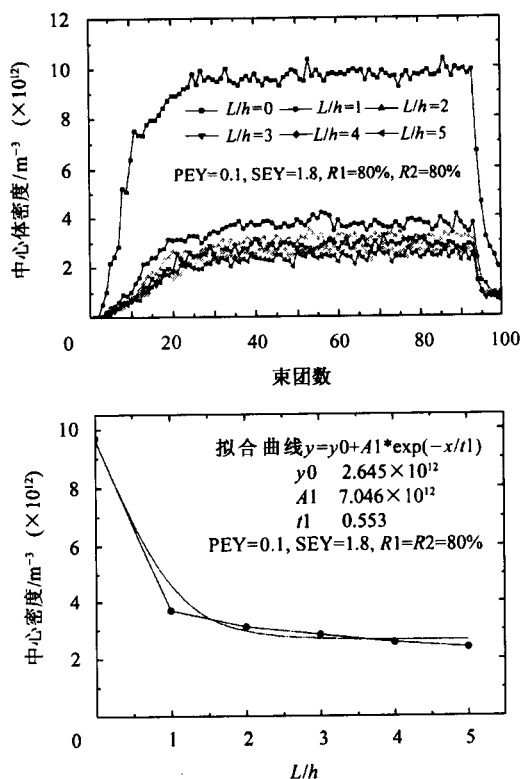


图 2 无 TiN 镀膜下的中心电子云密度

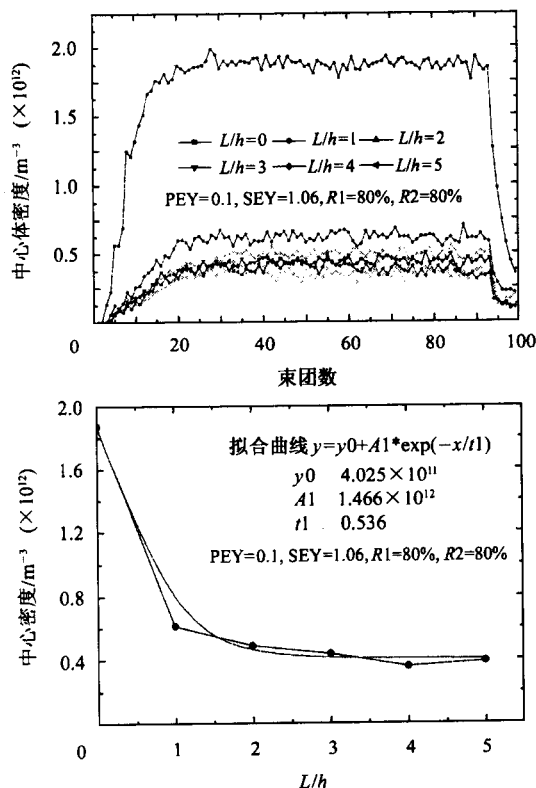


图 3 有 TiN 镀膜下的中心电子云密度

5 倍时,束流管道中的中心电子云密度约降低 5 倍; 相同形状真空管道中如果采用 TiN 镀膜方法降低二

次电子产额,则可以降低中心电子云密度约 5 倍,因此二次电子作用在 BEPC II 中是显著的.

图 4 是电子云在真空管道横截面上的分布. 由于前室作用使更多光电子在前室中产生,从而真空管道的前室中具有较大的电子云密度,真空室束流管道中电子云密度得到降低.

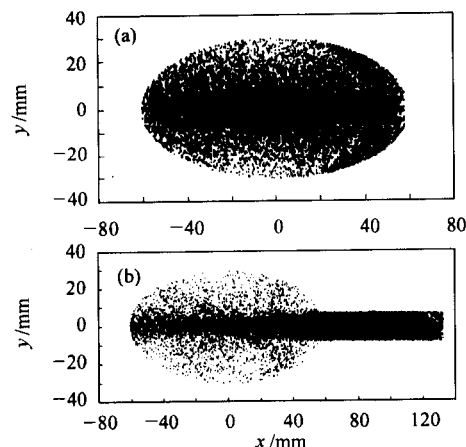
图 4 电子云在真空管道横截面上的分布
(a) $L/h=0$; (b) $L/h=5$.

图 5 中,变化二次电子产额从 1.0 到 2.0,考察二次电子产额变化对电子云中心密度的影响,结果表明当二次电子产额增加后,电子云中心密度迅速增加.

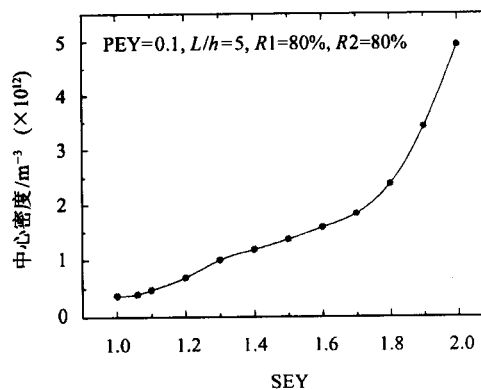


图 5 不同二次电子产额下的电子云中心密度

3.2 清洗电极对电子云密度的降低作用

在真空管道中放置清洗电极以改变电子云密度分布是降低中心区域电子云密度的措施之一. 电极采用直径 3mm 的圆形导线,放置位置于前室开口处,固定前室长度为高度的 5 倍. 清洗电极电场计算结果表明^[6],清洗电极电场在前室内部衰减很快,在深入前室一个高度后电场几乎降低为零;而在束流管道中,电场的分布较广,因此处于管道中心的电

子将受到清洗电场吸引作用向管道边缘移动,从而降低中心电子云密度. 图 6 的电子云分布证明了这一过程. 对于速度接近于光速的相对论性束流粒子,清洗电极电场对它们的运动几乎没有影响. 图 6 是置清洗电极电压为 800V 条件下的电子云分布和在清洗电极上置不同电压下的中心电子云密度计算结果.

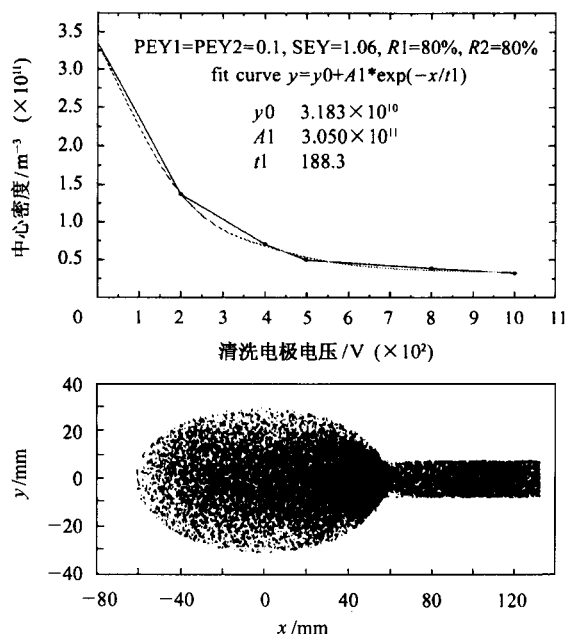


图 6 不同清洗电压下的电子云平衡密度和电子云分布 ($V = 800\text{V}$)

计算结果表明中心电子云密度随清洗电压的提高而降低,置 1000V 的清洗电压可以降低中心电子云密度约 7 倍左右. 计算结果还表明当清洗电压达到 200V 后,电子云密度随电压的变化逐渐变缓,这主要是由于清洗电极附近的电子云密度增大逐渐抵消了清洗电极电场作用的结果. 对没有 TiN 镀膜的真空管道中清洗电极电场作用的模拟结果与镀有 TiN 的效果相似^[6],只不过中心电子云密度由于二次电子作用而整体较高. 从清洗电极电场作用下的电子云分布(图 6)可以发现,真空管道中的电子云更多地聚集在清洗电极附近,前室入口处的光电子由于受到清洗电场作用运动到清洗电极附近导致前室中的电子云密度降低. 清洗电极放置在真空管道不同位置的模拟计算比较研究结果表明,图 6 中所选取的电极位置能够得到较好的效果^[6].

在真空盒管道前室束流方向的端面放置光子吸收器,有利于减少光电子产额. 光子吸收器的表面与同步光入射方向垂直,有效减少了光电子产额和反射系数^[10]. 在模拟程序中,前室中放置光子吸收器后,则前室中的光电子产额参数为 0.02,光子反射系数为 10%. 计算结果表明,采用这种措施可以使中心电子云密度降低约 3 倍. 对于不同抑制措施下电子云密度的模拟计算结果总结于表 2 中.

表 2 不同抑制措施下电子云密度模拟计算结果

抑制方法	前室长度 L/h	光电子产额 PEY	二次电子产额 SEY	平均线密度 λ/m^{-1}	中心体密度 ρ/m^{-3}
无抑制措施	0	0.1	1.8	3.478×10^{10}	1.035×10^{13}
仅用前室	5	0.1	1.8	1.973×10^{10}	2.22×10^{12}
仅用 TiN 镀膜	0	0.1	1.06	7.413×10^9	1.856×10^{12}
采用前室和 TiN 镀膜	5	0.1	1.06	3.588×10^9	3.261×10^{11}
采用前室和光子吸收器	5	0.02	1.8	5.567×10^9	7.188×10^{11}
前室,光子吸收器和 TiN 膜	5	0.02	1.06	7.299×10^8	1.355×10^{11}
采用前室和清洗电极	5	0.1	1.8	2.846×10^9	3.748×10^{11}
前室,清洗电极和 TiN 膜	5	0.1	1.06	6.021×10^8	3.334×10^{10}

4 结论

计算结果定量说明了前室型真空管道,内壁镀 TiN,清洗电极以及光子吸收器在降低中心电子云密度的作用. 目前的 BEPC II 设计中,已采用前室型真

空管道和内壁镀 TiN;由于工艺复杂和耦合阻抗等原因,清洗电极将作为提高束流性能的备用措施之一.

作者衷心感谢中日 ECI 合作研究小组和 BEPC 物理组同事的合作和支持.

参考文献 (References)

- 1 GUO Zhi-Yuan et al. HEP & NP, 2001, **25**(3):251—257 (in Chinese)
(国智元等. 高能物理与核物理, 2001, **25**(3):251—257)
- 2 Fukuma H et al. EPAC2000, Vienna, June 2000
- 3 Furman M A et al. PAC'97, Vancouver, 1997
- 4 Ohmi K. Phys. Rev. Lett., 1995, **75**:1526
- 5 Furman M A, Lambertson G. LBNL-41123, 1997
- 6 LIU Yu-Dong et al. IHEP-AC-AP-Note/2003-30, 2003 (in Chinese)
(刘瑜冬等. IHEP-AC-AP-Note/2003-30, 2003)
- 7 Bruning O. LHC Project Report, 1997, 158
- 8 Kirby R E, King F K. SLAC-PUB-8212, 2000
- 9 Bsssetti M, Erskine G A. CERN-ISR-TH/80-06, 1980
- 10 Ssetsugu Y et al. Journal of Vacuum Science Technology A., 2003, Vol. **21**

Simulation of the Electron Cloud Density in BEPC II *LIU Yu-Dong¹⁾ GUO Zhi-Yuan WANG Jiu-Qing

(Institute of High Energy Physics, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract Electron Cloud Instability (ECI) may take place in positron storage ring when the machine is operated with multi-bunch positron beam. According to the actual shape of the vacuum chamber in the BEPC II, a program has been developed. With the code, we can calculate the electron density in the chamber with different length of antechamber and the different secondary electron yield respectively. By the simulation, the possibility to put clearing electrodes in the chamber to reduce the electron density in the central region of the chamber is investigated. The simulation provides meaningful and important results for the BEPC II project and electron cloud instability research.

Key words electron cloud instability, secondary electron yield, vacuum chamber with antechamber, clearing electrodes