

# HLS 储存环高频调制实验

黄贵荣<sup>1)</sup> 徐宏亮 刘功发

(中国科学技术大学国家同步辐射实验室 合肥 230029)

**摘要** 在合肥光源(HLS)储存环上进行了高频调制实验, 结果表明采用调制频率接近同步振荡频率  $f_s$  的高频幅度或相位调制, 可以提高束流寿命. 而通常采用的是  $2f_s$  的调制方式. 实验测量了最佳调制频率和合适的调制度, 以及不同流强下调制引起寿命增长的程度. 同时观察到束流频谱中高次分量的降低, 这有利于抑制多束团耦合不稳定性.

**关键词** 储存环 高频系统 高频调制 同步振荡 束流寿命

## 1 高频调制原理简述

近几年来, 在同步辐射光源储存环上对高频加速场进行幅相调制技术引起了广泛关注. 其基本原理是当调制频率接近束流纵向同步振荡频率  $f_s$  的整数倍时, 将引起束团内粒子的重新分布, 导致束团长度拉长. 理论分析和多粒子跟踪计算的结果已经证明了这种效应<sup>[1, 2]</sup>. 束团拉长有2个重要作用, 其一是提高束流的托歇克(touschek)寿命, 而托歇克寿命在光源的束流总寿命中比重很大, 所以束流寿命将获得增长. 其二是可以抑制多束团的耦合作用, 提高束流的稳定性, 在一定程度上可以替代高次谐波腔和快速纵向振荡抑制电路. 这两者都技术复杂且成本较高, 而高频调制简便易行.

目前较多采用  $2f_s$  的相位调制(PM), 如 PF<sup>[3]</sup>, PLS<sup>[4]</sup>, SRRC<sup>[5]</sup>, BEPC<sup>[2]</sup> 等. 获得最大寿命增长的调制频率略低于  $2f_s$ , 如 PF,  $2f_s=47.2\text{kHz}$ , 当  $f_{PM}=46.9\text{kHz}$  时, 300mA 的寿命增长了 1.7 倍, 达 41h. 理论分析表明, 调制频率略低于  $2f_s$  时, 出现外岛效应, 在束团中心区域之外形成 2 个独立的粒子聚集区, 束团纵向密度下降. 但调制频率等于  $2f_s$  时, 外岛消失. 图 1 是 PF 用 dual-sweep streak camera 得到的单束团在不同调制频率下的振荡模式(引自文献[3]), 和理论分析非常吻合. 虽然较常用的是 PM 调制, 但据 BESSY<sup>[6]</sup>, SRRC<sup>[7]</sup> 报道, AM 方式效果基本相同.

其他  $f_s$  倍数的调制实验不多, 只有 ASTRIDII<sup>[8]</sup> 进行了 1—4 倍的 PM 调制, 都发现束流寿命增长. 单倍调制容易激励束流相干二极振荡, 可能引发束流不稳定. 而  $2f_s$  调制有抑制相干二极振荡的作用. 因此单倍调制也可以取得效果值得深入研究, 目前还没有单倍调制的理论分析和束团分布形态的测量结果.

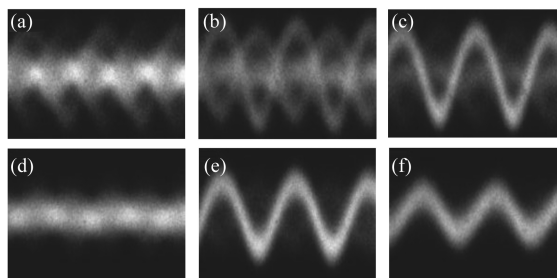


图 1 不同调制频率的束团振荡模式(PF 实验结果)  
(a) PM 46.8kHz, (b) 46.9kHz, (c) 47.0kHz,  
(d) 47.2kHz, (e) 47.3 kHz, (f) 47.4 kHz.

此外高频腔带宽对调制效果也可能存在影响. 例如文献[3]提到 PF 的调制实验,  $3f_s$  比  $2f_s$  调相效果差, 作者把原因归结为高频腔的带宽不够,  $3f_s$  调制信号在腔中建场弱.

在 HLS 进行高频调制实验之初, 采用  $2f_s$  方式, 没有明显效果. 于是试验  $f_s$ , 发现束流寿命增长. 但我们没有 streak camera, 无法测量在调制作用下束团的振荡模式. 今后拟进行多粒子跟踪模拟计算研究

2005 - 09 - 07 收稿

1) E-mail: grhuang@ustc.edu.cn

2) WANG Jiu-Qing. Private Communication

其物理机制. 单倍调幅实验进行得比较全面, 以下主要介绍HLS单倍调幅的实验结果. 由于高频踢除(RF Knock-out)系统正在改进, 储存环当前只能工作在全环45个束团均匀填充模式, 所有的调制实验都是在这种模式下进行.

## 2 单倍调幅的实验结果

### 2.1 高频调制的技术实现

HLS高频系统的源信号来自Agilent E4430B信号发生器. 该源具有内外幅相调制功能, 但内调制频率最大值为50kHz, 不能覆盖 $2f_s$ , 所以外接了Agilent 33250A函数发生器作为调制源. 这2个设备通过RS232口与控制系统连接, 在中央控制室就可以改变调制参数如调制方式, 频率和调制度等. 整个高频放大链具有 $\pm 4$ MHz的带宽, 对调制信号的幅度不会产生影响. 但高频腔的带宽只有约25kHz, 储存环的工作参数为能量800MeV, 腔压100—150kV, 相应的 $f_s$ 为29.8—36.5kHz. 当调制频率达到 $2f_s$ 时, 在腔中建立的调制场很弱, 为了得到较强的调制场, 需要加大源信号的调制深度, 这将导致调制信号中含有大量高次边带, 可能影响束流稳定, 甚至影响高频系统频幅控电路的稳定工作. 这也许是 $2f_s$ 调制没有效果的原因.

### 2.2 调制频率和幅度的确定

通过测量无调制下束流的频谱得到 $f_s$ , 在 $f_s$ 附近, 以步长0.1kHz扫描调制频率 $f_m$ , 得到图2所示的最佳调制频率区域. 其宽度约1.5kHz, 中心点比 $f_s$ 大约低2kHz. 在该区域内束流寿命增长, 区域外则迅速下降至接近无调制时的寿命.

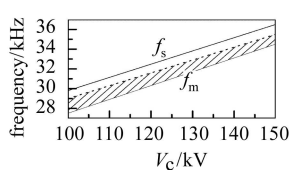


图2  $f_m$  与  $f_s$  的关系

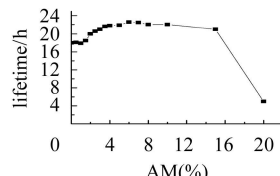


图3 不同调制度对束流寿命的影响

图3显示了调制幅度对束流寿命的影响, 这是腔压150kV、流强130mA时的实验结果, 说明4%—8%的调制度比较合适. 其他腔压和流强下的情况大致相同, 但当流强超过150mA, 如果腔压低至100kV, 将会由于严重的束流负载效应导致束流不稳定, 寿命低于10h. 此时加上很弱的调制都可能导致粒子大量丢失.

### 2.3 高频调幅使束流寿命增长的实验结果

图4显示了150kV腔压下流强105mA和50mA调制带来的寿命增长. 图中流强的陡降是为了缩短实验时间, 调整Q铁引起束流横向共振得到的. 从图中可看出调制的作用比较稳定.

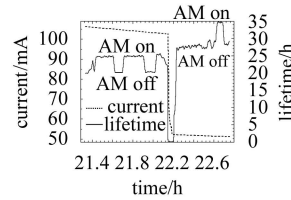


图4 调制引起的寿命增长

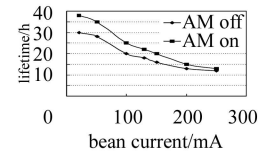


图5 束流寿命增长与流强的关系

在低流强下束流寿命主要由真空寿命和托歇克寿命决定. 但当流强较高时, 与流强有关的一些不稳定机制对寿命有影响, 同时由于同步辐射光的气体解析作用, 真空寿命有所下降, 托歇克寿命不一定是影响寿命的主要矛盾, 调制对束流寿命增长的作用有限. 图5是流强与寿命的大致关系以及调制后寿命增长的幅度, 这些关系会受到机器状态的影响. 例如曾发现150mA束流的寿命只有12h, 此时调制只能使寿命增加不到2h.

### 2.4 高频调制对束团长宽和频谱的影响

束流纵向拉长使束流纵向分布的高次谐波分量降低, 减弱了对高频腔纵向高次模的激励, 可以提高束流的纵向稳定. 图6显示了一个高频倍频程(204—408MHz)内调制产生的谱线幅度降低. 更高倍频也发现了这种变化, 但由于信号传输距离很长, 而传输电缆是普通同轴线(已计划进行更换), 高次信号衰减较大, 信噪比低, 给高次模式的甄别带来困难. 目前还没有确定某些具体模式的变化, 有些实验室的调制实验观察到了某些高次模的大幅降低(见文献[3—5]).

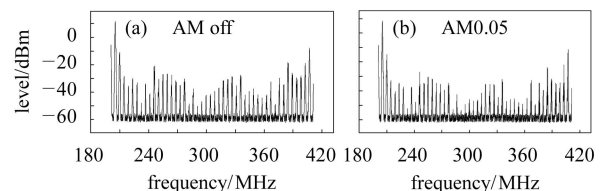


图6 调制作用下束流频谱的变化

纵向拉长导致束团能散增大, 水平方向尺寸将有所增长. 图7是从光位置监测器上看到的同步辐射光的横向截面.

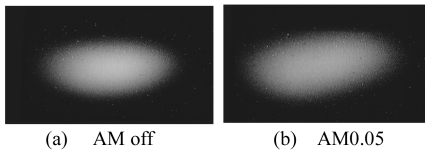


图7 调制作用下光斑水平方向增大

### 3 其他调制方式的实验结果

$f_s$  调相和  $2f_s$  调幅调相方式也进行了实验.  $f_s$  调相和上述调幅的结果基本相同, 合适的调相深度约为  $2^\circ$ — $3^\circ$ .  $2f_s$  调制作用不明显, 但是否确由高频腔带宽的限制造成, 还是存在其他因素, 仍需要进行研究. 其中  $2f_s$  调幅实验中发现当调制度达到 18%, 100mA(150kV) 的束流寿命大约增长了 2h, 但继续加大调制, 寿命很快下降. 调制深度为 30% 时, 束流出现不稳定, 寿命低到 1h 以下.

### 4 总结

单倍  $f_s$  调制可以提高束流寿命, 合适的调制深度是调幅 4%—8%、调相  $2^\circ$ — $3^\circ$ . 同时观察到束流频谱高次谐波分量降低和水平方向光斑增大, 说明在单倍调制作用下束团出现了纵向拉伸效应. 但其物理机制及束团内粒子的分布尚有待进行研究和测量. HLS 调制后束流寿命增长的幅度比其他实验室的实验结果低, 并且在高流强下寿命几乎不增长, 这些现象也需要进一步分析.

感谢高频组金凯、安宜宾等同事对本文工作的支持以及机器运行组在实验中提供的帮助. 北京高能物理研究所王九庆研究员提供的 BEPC 调制实验的方法和结果对作者深有启发.

### 参考文献(References)

- 1 Ng King-Yuan. Physics of Collective Beam Instabilities. US Particle Accelerator School. New York, June 2000, 177—181
- 2 Ellison J A, Shih H J. Phys. Rev., 1994, **E49**: 2484
- 3 Sakanaka S. Phys. Rev., 2000, **3**: 050701
- 4 Annual Report of Pohang Light Source. 2002—2003, 50—51
- 5 WANG Min-Huey, CHANG L H, CHANG P et al. Effect of RF Phase Modulation on the Longitudinal Beam Dynamics. PAC97. Vancouver, 1997. 1487—1489
- 6 Kuske P. Emittance Manipulations at BESSY I. Proc. of EPAC98. Stockholm, 1998
- 7 WANG Min-Huey, CHANG P, CHOU P J et al. Experiment of RF voltage Modulation at SRRRC. PAC(99). New York, 1999
- 8 Senichev Y, Hertel N, Lunt S et al. Increasing the Life Time of SR Sources by RF Phase Modulation. EPAC(98). Stockholm, 1998

## Experiment of RF Modulation at HLS

HUANG Gui-Rong<sup>1)</sup> XU Hong-Liang LIU Gong-Fa

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

**Abstract** The Experiment of RF modulation at the HLS(Hefei Light Source) is introduced. The 4%—8% AM(Amplitude Modulation) or the  $2^\circ$ — $3^\circ$  PM(Phase Modulation) with the modulated frequency closed to the longitudinal synchrotron oscillation frequency improves the beam lifetime. The experiment also finds out the intensity of the beam spectrum reduced after applying the RF modulation, which shows that the modulation is useful for suppressing the coupled-bunch instability.

**Key words** storage ring, RF system, RF modulation, synchrotron oscillation, beam lifetime

Received 7 September 2005

1) E-mail: grhuang@ustc.edu.cn