

合肥光源电子束流能量标定的前期研究*

徐宏亮¹⁾ 孙葆根 张剑锋 许炳 黄贵荣

(中国科学技术大学国家同步辐射实验室 合肥 230029)

摘要 为了在合肥储存环上利用共振退极化的方法建立一套测量电子束能量的装置,进行了物理计算,并且搭建了利用测量束流损失来测量托歇克寿命相对变化的装置,利用这个装置测量了托歇克寿命造成的束流损失相对的变化,以期用这个的束损测量系统监测退极化造成的束流托歇克寿命的变化.

关键词 束流能量 束流极化 共振退极化 退极化时间 自旋相应函数

1 引言

用于同步辐射的合肥电子专用储存环和世界低能储存环一样,同时用于真空紫外和软X射线标准光源^[1],这就意味来自弯铁的同步辐射谱光子通量必须用光源参数来精确计算,显然计算谱光子通量的准确性,依赖于所给机器参数的准确性,所以有关储存环参数必须被精确测量,典型的精度要达到 10^{-4} ,这样获得的计算通量精度才能满足要求;而在计算光子通量时,所需的重要参数就是储存电子束的能量,为了使能量的测量精度达到 10^{-4} ,可以用共振退极化的方法^[2-4]测量,而且测量方便简单;共振退极化方法就是通过精确测量极化电子束电子自旋进动频率,从而推算出精确的电子束能量,这种方法首先用于VEPP-2M储存环上,接着DORIS、CESR和LEP都用相似方法标定它们的能量,中低能同步辐射专用环BESSYI^[2], BESSYII^[3], ALS^[4]已经用这种方法成功标定其电子束能量.

2 托歇克寿命

储存环的束流寿命主要由真空寿命和托歇克寿命决定的,束流寿命在有剩余气体时,

$$\frac{1}{\tau} = \frac{1}{\tau_V} + \frac{1}{\tau_t}, \quad (1)$$

这里 τ_t 是托歇克寿命, τ_V 是真空寿命,如果真空寿命远远大于托歇克寿命,则束流的寿命近似为

$$\tau \approx \tau_t \left(1 - \frac{\tau_t}{\tau_V}\right). \quad (2)$$

在这种情况下,束流寿命主要是托歇克寿命决定的,托歇克寿命和束流内粒子数成反比即 $\tau_t N$ 是常数,随着时间的增长,束团内的粒子数会减小,托歇克寿命随着增长.

托歇克寿命可以由下式进行计算^[5],

$$\frac{1}{\tau_t} = -\frac{1}{N} \frac{dN}{dt} = \alpha N, \quad (3)$$

$$\alpha = \frac{\sqrt{\pi} c r_e^2}{\gamma^3 V \sigma_x' (\Delta p_m / p)^2} C(\varepsilon), \quad (4)$$

r_e 是电子的经典半径, $\Delta p_m / p$ 是动量接受度, γ 是洛伦兹因子, $V = (4\pi)^{3/2} \sigma_x \sigma_y \sigma_t$ 是束团的体积,函数 $C(\varepsilon)$ 定义如下:

$$C(\varepsilon) = \varepsilon \int_{\varepsilon}^{\infty} \frac{1}{u^2} \left[\left(\frac{u}{\varepsilon}\right) - \ln\left(\frac{u}{\varepsilon}\right)^{1/2} - 1 \right] e^{-u} du, \quad (5)$$

$$\varepsilon = \left(\frac{\Delta p_m}{\gamma^2 \sigma_x' m c} \right)^2. \quad (6)$$

由此可见托歇克寿命会随着束流的发射度的减小而变短;托歇克寿命造成的束流损失随流强降低而减小,随着发射度减小而增加.极化电子束的托歇克寿命比非极化的托歇克寿命长^[1, 2],所以极化电子束被退极化后束流损失会增加,就是测量这个束流损失的变化,来间接测量束流极化度的变化,从而精确测量电子束能量.

3 退极化共振条件

无极化的电子注入储存环后,在一定的时间内达

2008 - 01 - 07 收稿

* 中国科学院知识创新课题基金(KY4206)和自然科学基金(10575096)资助

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

到极化, 在理想情况下, 极化时间为^[1]

$$\tau_p(s) = 98.66 \frac{\rho(m)^2 R(m)}{E(\text{GeV})^5}, \quad (7)$$

HLS的极化时间取 4.346h.

电子的自旋进动频率和电子的能量存在着这样的关系:

$$\omega_{\text{spin}} = (1 + \alpha\gamma)\omega_0, \quad (8)$$

$\gamma = E/m_0c^2$; α 是磁自旋反常因子; $\alpha = (g - 2)/2 \approx 0.00115965219$.

在电子束极化建立以后, 给束流加一个径向退极化磁场, 其频率 w_{dep} 满足:

$$w_{\text{dep}} = (\alpha\gamma \pm n)\omega_0. \quad (9)$$

这个外加磁场频率与自旋进动频率相等而共振时, 就会退掉束流的极化; 选择一个合适的频率范围, 在这个范围内以频宽 $\delta\omega_{\text{dep}}$ 递增扫频, 同时用束损测量系统观测此时的电子损失率变化; 一旦电子损失率发生上升的变化, 则可以认为此时束流发生共振退极化. 此时的高频频率即精确的退极化频率, 由公式 (9) 即可计算出束流的能量.

4 退极化磁场

合肥储存环上退极化磁场是通过馈入功率到条带而产生的, 功率由高频插座馈入到条带上. 图 1 为在不同功率下, 在退极化位置处产生的积分峰值磁场, 这组数据是在 $\delta\omega_{\text{dep}} = \pm 2\pi \cdot 1\text{kHz}$ 得到的.

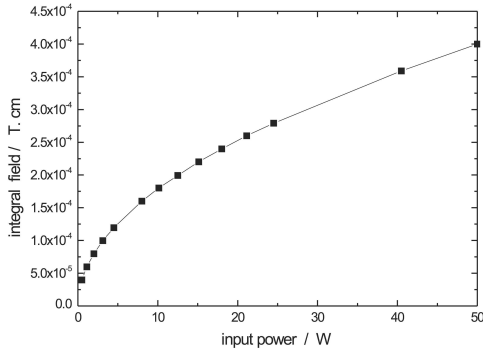


图 1 输入功率随积分场的变化

外加的高频磁场通过功率放大器, 加到储存环垂直方向的两个条带上, 产生一个径向的高频磁场, 条带上的输入功率带入下面公式^[6]:

$$\tau_{\text{dep}} = \delta\omega_{\text{dep}} \frac{Z_s}{2P} \cdot \left(\frac{\langle H_z \rangle 2L\pi r a}{\Omega_z l_{\text{dep}} |F(s_{\text{dep}})|} \right)^2, \quad (10)$$

$\langle H_z \rangle$ 是垂直磁场的平均强度; $\langle H_z \rangle = 2\pi\rho H_z/L$; l 是退极化磁场的长度; L 是储存环的周长; r 是束流和条带的距离. 对于 HLS, $\mu_0 H_z = 1.2\text{T}$, $l_{\text{dep}} = 72\text{cm}$, $L = 66\text{m}$, $\omega_{\text{spin}} = 2\pi \cdot 3.6969\text{MHz}$, 考虑到实际束流存在 β 振荡, 取 $r = 4\text{cm}$, $F(s_{\text{dep}})$ 是条带处的自旋极化函数^[7], HLS 由于真空室上的条带位置固定, 退极化场处的 $F(s_{\text{dep}}) = 1.569$. 因此, 可以看到, 退极化时间 τ_{dep} 由输入功率 P 决定, τ_{dep} 一般应选择小于 100s.

5 束损监测系统对托歇克寿命的测量

合肥储存环上安装有束损监测系统, 可以用来测量托歇克寿命的相对变化, 但是其计数率太低, 正常情况下真空室外部的一个探头计数率仅为 100 左右, 且积分时间较长 (30s), 不能够满足实验要求, 所以重新研制了一套测量束流损失的装置, 探头是闪烁体加光电倍增管, 在环内和环外安装一对探头, 从光电倍增管出来的信号经过整形放大, 它们的信号同时输入到复合与门, 环内外侧探头同时有信号, 复合门就输出一个脉冲信号, 因为托歇克寿命的电子损失是成对的, 所以从复合门输出的信号就反映了托歇克寿命的束流损失, 为了去掉流强和发射度变化对测量数据的影响, 我们用流强和束流发射度对束损测量的结果进行归一化, 如图 2 一次运行过程中束流损失的数据.

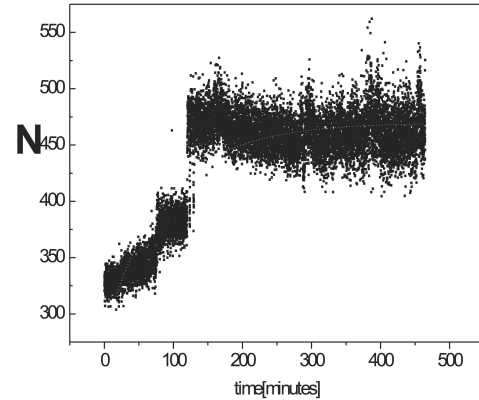


图 2 归一化以后的束流损失记数

6 结论

共振退极化测量束流能量的装置所需参数都已经计算结束, 装置已经搭好, 可以进行精确测量束流能量的实验.

参考文献(References)

- 1 Arnold D, Ulm G. Rev. Sci. Instrum., 1992, **63**: 1593
- 2 Klein R, Mayer T, Kuske P et al. Nucl. Instrum. Methods in Physics Research A, 1997, **384**: 293—298
- 3 Steier C, Byrd J, Kuske P. Proceeding of EPAC2000, 26~30 June 2000, Austria Center ienna, 1566—1568
- 4 Kuske P, Mayer T. Proceeding of EPAC 1996, Universitat Autonoma de Barcelona, 10~14 June 1996. 1570—1572
- 5 Lee T Y, Kim M G, Park E S. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 2002, **489**: 38—441
- 6 Derbenev Ya S, Kondratenko A M et al, Particle Accelerators, 1979, **9**: 247—266
- 7 ZHANG Jian-Feng, XU Hong-Liang, SUN Bao-Gen. High Power Laser and Particle Beams, 2006, **18**(1): 124—126 (in Chinese)
(张剑锋, 徐宏亮, 孙葆根. 强激光与粒子束, 2006, **18**(1): 124—126)

Prophase Study of Electron Beam Energy Calibration for HLS*

XU Hong-Liang¹⁾ SUN Bao-Gen ZHANG Jian-Feng Xu Bing HUANG Gui-Rong

(University of Science and Technology of China, Hefei 230029, China)

Abstract To build the set-up for energy calibration of electron beam by the method of resonant depolarization in HLS, physics calculation is finished, and the beam loss monitor system to measure the relative change of Touscheck lifetime made. With this system, the beam loss of Touscheck lifetime is measured. The change of Touscheck lifetime is expected to be measured due to depolarization.

Key words beam energy, beam polarization, resonant depolarization, depolarization time, spin response function

Received 7 January 2008

* Supported by CASKIP-NSRL (KY4206) and National Nature Science Foundation of China (10575096)

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