

# 用条纹相机测量 BEPC 的束团长度\*

赵政 国智元 刘德康 马力 秦庆 王九庆 徐刚

(中国科学院高能物理研究所 北京 100039)

**摘要** 在北京正负电子对撞机(BEPC)中,正负电子束团的长度及其拉伸是束流性能重要指标之一,它直接影响到物理实验的效率,对 BEPC 的改进和性能进一步提高也起着关键的作用.由于用条纹相机测束团长度,具有精度高,且直观的特点,因此,近年来条纹相机在加速器束团测量领域得到了广泛的应用.本文将介绍用条纹相机测量 BEPC 储存环束团长度的原理、方法、系统配置、误差分析及一些典型的测量结果.

**关键词** 储存环 同步辐射光 条纹相机 束团长度

## 1 引言

当正、负电子束团在储存环中以接近光速做弯转运动时,正、负电子沿其运动的切线方向辐射出同步辐射光,这种同步辐射光的光谱范围很宽,是从红外线直至硬 X 线的连续光谱.由于电子束团辐射出同步光的强度及时间结构与束团本身的密度及长度有着极强的相关性,因此,通过对电子束团辐射出的同步光的测量,便可获得电子束团的许多特性.

## 2 条纹相机的功能及测量原理

条纹相机是一种测量超短光脉冲的装置,其输入信号是超短光脉冲,在加速器领域这种光脉冲可以是同步辐射光、自由电子激光等.条纹相机的输出是二维的条纹状图像,条纹相机因此而得名.通过对条纹相机输出的条纹状图像的测量、分析便可得到输入光脉冲的时间结构.本文介绍的是日本滨松公司生产的 C5680-II 型条纹相机<sup>[1]</sup>.其工作原理如图 1 所示.该种条纹相机主要由以下几部分组成:光输入狭缝、输入光学透镜、光阴极、加速栅极、偏转板、微通道板、磷屏、输出光学系统、CCD 相机等.工作原理可以用在时间、空间和强度上有着细

微差别的 4 个光脉冲来简要说明如下:4 个光脉冲依次通过输入狭缝及透镜后,到达光阴极,光阴极由 Sb,Na,K 和 Cs 的混合物组成;当光脉冲中的光子轰击光阴极时,在光阴极的背面将会产生光电子束团;光电子束团经过加速栅的加速后,通过一对垂直偏转板,在加在偏转板上的斜坡扫描电压所产生的随时间变化的垂直磁场的的作用下,4 个光电子束团在时间上的前后差别被转化为垂直方向上位置及偏转角上的差别;光电子束团在通过微通道板时获得倍增,轰击磷屏,并在磷屏上留下 4 个光斑图像,这 4 个光斑图像在垂直方向上反映的是入射光脉冲时间轴上的信息,光斑的亮度反应的是入射光脉冲的强度,入射光脉冲位置的信息将在磷屏水平方向上得到反映.

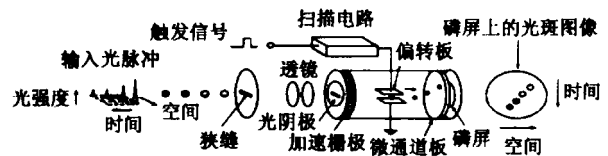


图 1 条纹相机工作原理

## 3 BEPC 储存环同步辐射光的引出

在 BEPC 储存环中测量束团长度所使用的同步

2002-05-13 收稿

\* 国家自然科学基金(19975056)资助

辐射光是由在注入点附近,在二极磁铁内做弯转运动的电子束团产生的.同步辐射光被真空管道内的水冷镀金铜镜反射后穿过石英玻璃窗从真空管道内引出,再经一块遥控平面反射镜反射及一块凸透镜聚焦后,最终将同步光光斑聚焦在条纹相机的输入狭缝上.

## 4 测量系统

整个测量系统主要由以下几部分组成:条纹相机主机(C5680-II),同步扫描单元(5675),双时基扫描单元(5679),双时基扫描触发信号产生单元(PG502),同步扫描触发信号延迟单元,电源箱,计算机(Mac. 81000)系统等组成.测量系统框图如图2所示.

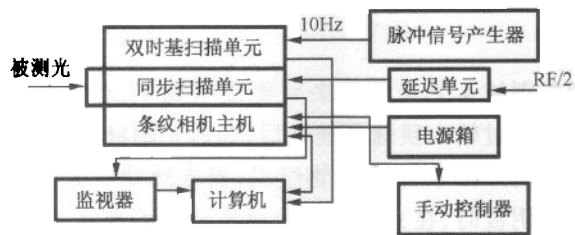


图2 测量系统框图

同步扫描单元用于产生一个加在同步(垂直)扫描单元偏转板上的斜坡扫描电压,它的触发信号来自于高频信号(199.53MHz),分频并经同步扫描触发信号延迟器延迟调整后送入同步扫描单元,使同步扫描单元产生的斜坡电压与被测同步光信号同步.双时基扫描单元用于产生一个加在水平扫描偏转板上的斜坡扫描电压,它的触发信号来自 PG502 脉冲信号产生器,PG502 脉冲信号产生器输出一个 10Hz 的脉冲信号作为双时基扫描单元的触发信号.电源箱为条纹相机提供其所需的各种高、低压直流电源.在计算机内装有的 GP-IB 接口通讯板、图像采集板及条纹相机的操作控制软件 U5565 等用于对条纹相机进行控制、图像采集及数据分析.

BEPc 储存环中束团长度的变化在几个厘米范围内,因此,在实际测量时,我们选择垂直扫描的第四档(满量程相当于 2ns).电子束团中的电子在纵向上近似为高斯分布,其标准偏差  $\sigma$  值,被定义为束团长度. U5565 分析软件可自动给出光强随时间的变化曲线以及这个曲线的半高全宽数值,但它所指的是最大光强的一半所对应的宽度,不能满足我们的要求,因此,需要对测量数据进行拟合,得到高

斯分布的标准偏差  $\sigma$  值,再经分析、计算得出束团长度、拉伸效应,及其它相关参数.

## 5 误差分析与控制

条纹相机提供了一种对加速器束团进行绝对测量的手段,我们用它作为 BEPC 储存环束团长度测量的基本方法,因此,由这种测量方法引起的误差及如何控制、减小误差对于测量精度的提高极为重要.

### 5.1 系统误差

系统误差包括扫描非线性误差、静态像误差及各扫描档之间的误差<sup>[2]</sup>.

#### 5.1.1 扫描非线性误差

扫描非线性误差是由加在垂直偏转板上的同步扫描斜坡电压的非线性引起的,在厂家提供的测试报告中给出的各扫描档的非线性数据如表 1 所示.

表 1 各垂直扫描档的非线性数据

	I	II	III	IV
偏差/ns	0.119	0.698	1.20	1.71
非线性度	0.08%	0.17%	0.47%	-0.94%

#### 5.1.2 静态像误差

在理想的情况下,当条纹相机的水平及垂直扫描板上不加扫描电压时,其输出光斑的尺寸应为零;但实际情况是,即使条纹相机的水平及垂直扫描板上不加扫描电压,条纹相机输出的光斑仍有一定尺寸,它主要由条纹相机输入狭缝的大小、光学系统的色散等原因造成.我们可通过以下方法来克服这种误差:将条纹相机的水平及垂直扫描板上的扫描电压关掉,在自然光条件下测量不同大小输入狭缝及不同扫描档所对应的静态像,再在实际的测量结果中扣除静态像,从而,最大限度地修正静态像引起的误差.表 2 所列数据是在不同圆孔形输入狭缝及不同扫描档下测量得到的静态像的尺寸.

表 2 不同圆孔形狭缝及不同扫描档所对应的静态像数据

直径/ $\mu\text{m}$	垂直扫描档			
	I /ps	II /ps	III /ps	IV /ps
10	0.46	2.46	4.50	6.23
30	0.58	3.37	5.74	7.95
100	1.37	7.56	13.55	18.77
150	2.59	15.04	25.60	35.47

修正静态像后的束团长度为

$$\sigma_1 = \sqrt{\sigma_{\text{meas}}^2 - \sigma_{\text{static}}^2}, \quad (1)$$

这里  $\sigma_{\text{meas}}$  为实际测量的束团长度值,  $\sigma_{\text{static}}$  为静态像尺寸.

由于修正量是个定值,且呈非线性规律,因此在束团较短时,修正量较大,如束团长度 1.5cm 时,修正量达 5%;在束团较长时,修正量较小,如束团长度 6cm 时,修正量仅 0.2%.

### 5.1.3 各扫描档之间的误差

条纹相机的垂直扫描分为 4 档,当用不同的档对相同状态下的同一束团进行测量时,各档下的测量值会有差别.在实际测量过程中我们对常用的第三档及第四档进行了比较,其差别约为 2%—3%.

另外,用低流强下的理论束团长度值对实际测量的束团长度进行了标定,在不同的能量下,实际测量的束团长度平均比其理论值长约 3.17%<sup>[3]</sup>.

## 5.2 随机误差

在实际测量过程中,我们发现在储存环状态及测量系统设置不变的条件下,束团在环中运行的各圈所测长度的值有差别,这种差别在流强很弱和流强较强时尤为明显,其差别约 2.5% 左右.分析这种随机误差主要由以下几个原因造成:当流强较强时,束团的纵向不稳定性是引起随机误差的主要原因;当流强很弱时,束团辐射的同步光较弱,信噪比较差,此时,统计涨落误差是引起随机误差的主要原因.另外,在对测量数据进行高斯拟合时,也存在一定的偏差.为了克服这种误差,对每个测量点进行 10 次测量,并将 10 次测量的数据进行平均处理,这样,可将误差减小到约 1.76% 左右.

## 6 测量结果<sup>[3,4]</sup>

图 3—6 给出一些典型的测量结果.

图 3 显示的是用条纹相机测量得到的 BEPC 储存环束团的条纹像.电子束团的回旋周期约为 800ns,垂直扫描满屏为 2ns,水平扫描满屏为 5μs,6 个条纹像是同一电子束团连续回旋 6 圈的状态信息.图 4 给出了 BEPC 储存环的束团拉伸规律和分析的比较.图 5 显示的是在相同的高频电压,不同的动量压缩因子的条件下,束团长度随流强的变化,图中显示,在非常低的流强时,束团的自然长度随动

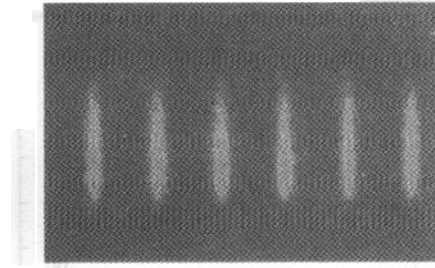


图 3 BEPC 储存环束团的条纹像

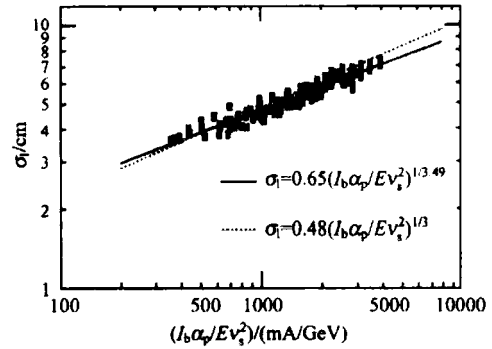


图 4 BEPC 储存环束团的拉伸规律

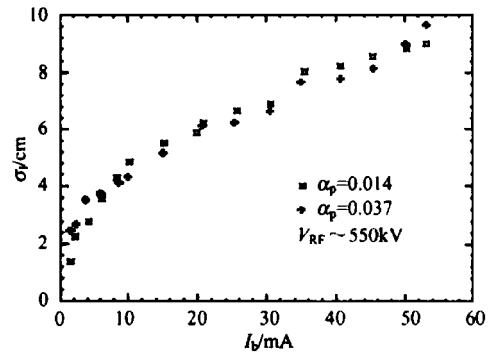


图 5 不同动量压缩因子下的束团长度与流强的关系

量压缩因子的不同而不同,但随着流强的增大,不同的动量压缩因子条件下束团长度逐渐趋于一致.图 6(a)和(b)分别显示储存环束团长度在不同的高频电压和不同能量下,与束流强度的关系,所有数据都是在单束团条件下测得的.

我们将在不同能量、不同高频电压及不同流强下测量得到的电子束团长度的数据拟合后,得到了 BEPC 储存环的束团拉伸规律如下:

$$\sigma_1 = \sigma_{1s} + \Delta\sigma_1, \quad (2)$$

$$\sigma_{1s}(\text{cm}) = 0.65 \times \left( \frac{I_b(\text{mA}) \alpha_p}{E(\text{GeV}) \nu_s^2} \right)^{1/3.49}$$

$$\Delta\sigma_1 = \sigma_{1s} \times (-3.17\% \pm 1.76\% \pm 2.50\%).$$

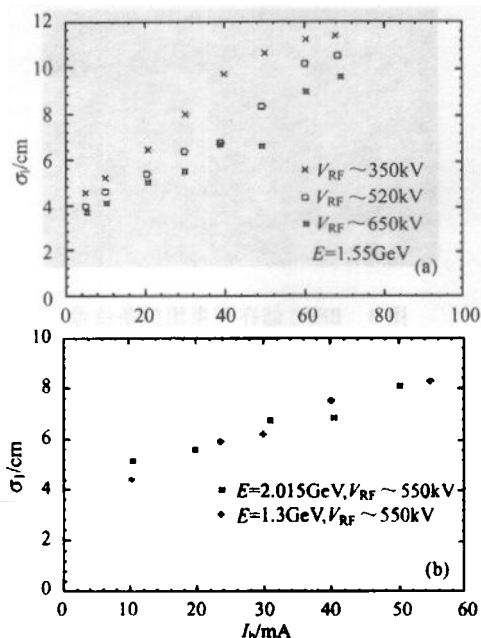


图 6

(a) 不同电压条件下束团长度与流强的关系;

(b) 不同能量下束团长度与流强的关系.

储存环束团的拉伸变化规律在图 4 中以实线表

示,虚线表示的是束团长度与因子  $\xi = I_b \alpha_p / E v_s^2$  的 1/3 次方的关系. 从图 4 中可以看出 BEPC 储存环束团的拉伸变化规律与 Boussard<sup>5)</sup> 方程没有很大差别.

对于 BEPC 中微波不稳定性的流强域值,用束团拉伸规律可得到以下的经验公式:

$$I_{th}(\text{mA}) = 4.71 \times \frac{\alpha_p^{2.49} E(\text{GeV})^{4.49}}{v_s^{1.49}} \quad (5)$$

## 7 结束语

通过用条纹相机对 BEPC 储存环束团的测量,得到了 BEPC 储存环束团长度与流强、束流能量、高频电压及动量压缩因子之间的关系,并通过对大量测量数据的拟合分析得到了 BEPC 储存环束团长度的拉伸规律. 这些测量结果,为了解 BEPC 储存环的运行状态,进而改进 BEPC 储存环的性能提供了重要的依据.

作者对 BEPC 运行组在测量、实验过程中给予的协助表示感谢.

## 参考文献 (References)

- 1 <http://usa.Hamamatsu.com/sys-streak/operation/operation.htm>
- 2 LIU De-Kang et al. Proceedings of the Workshop on BEPC Performance. 1996
- 3 GUO Zhi-Yuan et al. Proceedings of the Workshop on BEPC Performance. 1996
- 4 QIN Qing et al. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. 2001, A463:77-85
- 5 BOUSSARD D. CERN Lab. II /RF/Int. 75-2, 1975

## Bunch Length Measurement of BEPC with a Streak Camera\*

ZHAO Zheng GUO Zhi-Yuan LIU De-Kang MA Li QIN Qing  
WANG Jiu-Qing XU Gang

(Institute of High Energy Physics, CAS, Beijing 100039, China)

**Abstract** In the BEPC electron-positron storage ring, the bunch length and its lengthening are quite important characters. It determines the efficiency of getting physical events and the luminosities achievable, and it plays a key role in the upgrade of BEPC. Because of advantages of precision and visualisation, streak camera is commonly used to measure the beam length in accelerators. In this paper we describe the operation principle, the features and the basic system configuration of the streak camera. The systematic and random errors in the measurement are analysed. Some typical results of measurement in recent years are presented.

**Key words** storage ring, synchrotron radiation, streak camera, bunch length

Received 13 May 2002

\* Supported by NSFC (19975056)