

加速器束团长度测量

黄国庆^{1,2} 叶恺容¹

1 (中国科学院上海应用物理研究所 上海 201800)

2 (中国科学院研究生院 北京 100049)

摘要 随着技术的不断发展,近年来出现了多种加速器束团长度的测量方法,主要有条纹相机测量、迈克尔逊干涉仪测量、电光晶体测量、耦合束流频谱测量等。本文综合介绍了这些方法,并指出各种方法都有自己的优缺点及适用范围。目前国际上各大型加速器实验室普遍采用的是条纹相机测量方法,对于自由电子激光等超短束团一般都是采用光学技术、频域方法测量,有些测量法的分辨率可达到飞秒级,提供了具有更高空间分辨率、更高时间分辨率的强有力研究手段。

关键词 束团长度测量, 条纹相机, 迈克尔逊干涉仪, 频域

中图分类号 TL506

随着加速器技术的不断发展,对束流质量的要求越来越高,束团尺寸、发射度也越来越小。特别是随着自由电子激光、直线粒子对撞机、高性能光源的发展,束团长度已经向着皮秒、飞秒的方向发展了。因此对束团长度测量的分辨率要求也越来越高。

束团长度是加速器中的一个重要参数。随着电子技术、光学技术等不断发展,出现了许多新的束团长度测量方法,测量的精度也在不断提高。

1 束团长度测量方法

目前测量束团长度的方法有许多种,如图1所示。另外,束团长度可以采用机械方法、电磁方法、光学方法来测量。其中机械方法反应速度慢,测量精度低,现在已基本不使用了。电磁方法反应速度较快,测量精度较高,成本低,但对于测量超短束团就显得无能为力了。光学方法^[1]是近些年来发展起来的一种束团长度测量方法,它具有反应速度快,测量精度高的特点,但成本较高,系统也较复杂。SR^[2,3] (Synchrotron radiation)、DR^[4,5] (Diffraction radiation) 是非拦截型测量技术,其中 SR 技术应用最广,理论完善,它的测量装置体积较大,系统也较为复杂,普遍应用于储存环之类的环形加速器中,因为环形加速器中有二极铁,粒子弯转将会产生同步辐射光,正好利用此光来测量束团的参数。DR 技术是近几年兴起的新的测量技术,它的系统装置体积小,结构也较为简单,对束团影响小,适用于

直线加速器的测量,也可用在储存环之类的环形加速器中的直线节处,但对于后向 DR 来说,弯铁处的 SR 将会污染后向 DR,所以必须想办法将两者分开^[6]。

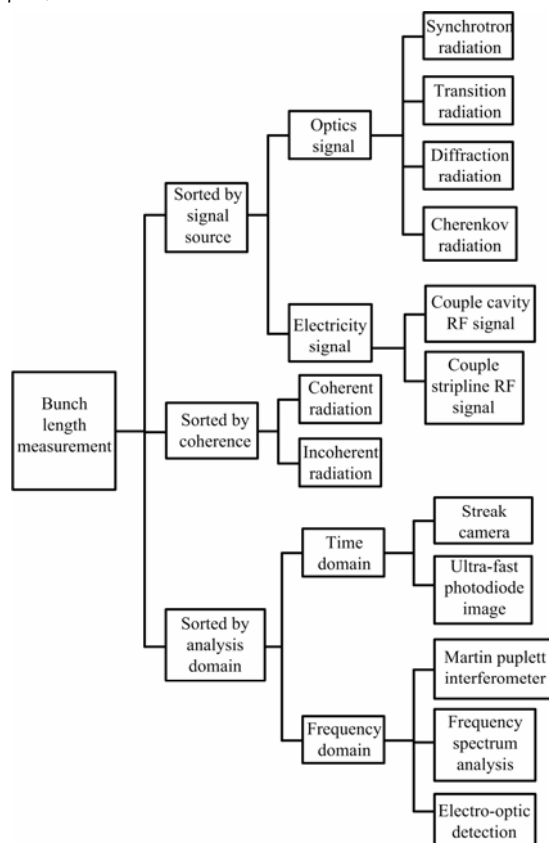


图1 束团长度测量方法
Fig.1 Various measurement methods of bunch length

第一作者: 黄国庆, 男, 1977 年出生, 2001 年毕业于长春光机学院, 现为中国科学院上海应用物理研究所读博士研究生, 主要从事加速器束流测量的研究工作

收稿日期: 2006-09-12, 修回日期: 2006-11-06

切伦柯夫辐射^[7]、TR^[8,9] (Transition Radiation) 从某种意义上讲,也可以算为非拦截测量技术,但他们束流影响大,不适用于束团品质要求很高且粒子周期循环运动的储存环中,多用于直线加速器的测量。切伦柯夫辐射、TR 都可以用来精确测量束团的参数,其中 TR 用得较多,且 TR 与 DR 在某些地方有其相似的地方。

下面将介绍一些主要的束团长度测量方法。

1.1 用条纹相机来测量束团的纵向尺寸^[10,11]

条纹相机是一种典型的时域测量手段,它可以测量束团的时间分布(纵向长度)和空间分布(束团位置),其精度高,响应速度快,能实现单个微束团测量,即测量的是单个束团的长度,而不是多束团的平均长度,因此可以用它来观察储存环中多个束团的相互作用,研究束团的不稳定性。另外,条纹相机本身对测量影响很小,这样测量结果与理论值很接近。目前 HAMAMATSO 公司的 C6138 条纹相机的分辨率可达到 200fs。

1.2 用高速采样示波器来测量束团的纵向尺寸^[12]

这种方法是从二极铁引出的同步辐射光,照在快速光电二极管上,产生电信号,然后用高速采样示波器对此电信号进行采样、分析,得到束团的纵向尺寸。如 SRS 用这种方法测量了长度小于 5ps 的束团^[12]。

1.3 迈克尔逊干涉仪^[13,14,15]

对于自由电子激光等机器中的超短束团,用时域、条纹相机方法就很难测出,于是出现了频域测量方法,测量精度也大大提高了。迈克尔逊干涉仪就是一种典型的频域测量方法。

迈克尔逊干涉仪的原理如图 2 所示。当具有一定角度分布的辐射光(如相干渡越辐射、相干衍射辐射、相干同步辐射)经一个抛物面镜反射后成平行光入射迈克尔逊干涉仪,此平行光被分束器(Beam splitter)分成两束光,一束反射光到达定镜后,又被反射回来,透过分束器,到达观测点;另一束是透射光,到达动镜后,被反射回来,再次被分束器反射,到达观测点,在此与前一束光相干。此光学过程等价于信号处理中的自相关处理,在满足一定条件时,它的傅立叶变换是光束的功率谱分布。

调节动镜的距离,当两束光线的光程差为零时,在观测点的光强最大;当两束光线的光程差小于束团长度时,随着光程差的增大,光强逐渐减小;当

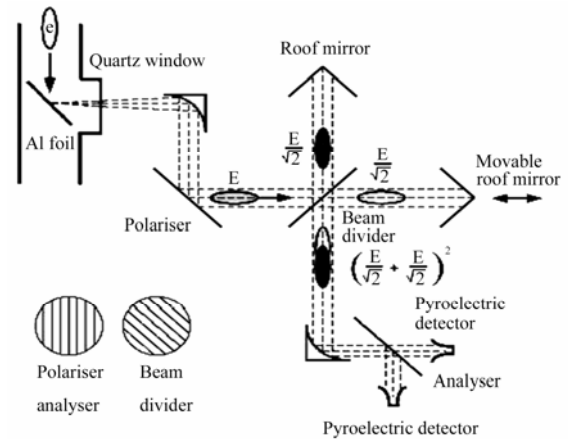


图 2 迈克尔逊干涉仪原理图^[13]

Fig.2 The Martin-Puplett interferometer^[13]

两束光线的光程差大于束团长度时,则光强不随光程差的增大而变化。不断调节动镜距离,测得光强随动镜变化的曲线如图 3 所示。图 3 是 SUNSHINE 实验室测得的干涉图,它相当于粒子分布的傅立叶变换,所以直接测量干涉图中曲线的半高宽,就可以得到束团长度。SUNSHINE 实验室用这种方法测量到了 100fs(rms)的束团长度。

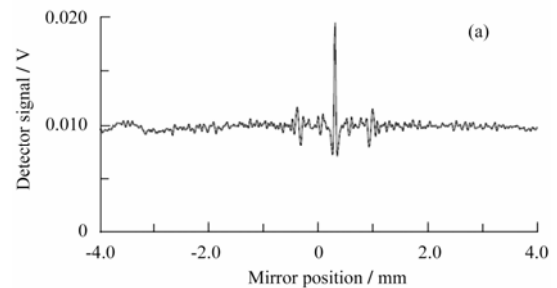


图 3 SUNSHINE 测得的干涉图^[14]

Fig.3 The interferogram of SUNSHINE^[14]

由于迈克尔逊干涉仪动镜的移动是机械运动,所以它的响应速度很慢,不能实现单个微束团的测量,它所测的是多个宏束团中的微束团的平均长度。为了减少测量时间,通常只取一些点测量。

1.4 零相位法(Zero-phasing)^[16,17,18]

在 1997 年 CEBAF 报告他们用零相位法测得了当时最短的束团长度 84fs (rms)。可见零相位法也是一种测 ps、fs 束团长度的好办法。测量系统由几段加速腔、一个能谱分析器及水平截面测量系统组成。其结构如图 4 所示。

其测量原理是:让电子束位于零加速相位,经过一定数量的加速腔以后,电子束在其中心处能量保持恒定的同时获得沿头尾近似线性的能量调制,经过偏转磁铁以后,沿纵向的能散分布转化为空间

分布,这样就可以使用空间尺寸测量系统测出这种空间分布,进而便可得到束团的纵向分布。

图5是CEBAF的实验结果,他们采用金属线扫描器来测量经过偏转磁铁后的电子束的水平截面

尺寸,扫描器信号强度正比于电荷密度,图中a是横模腔关闭测得的图形,b、c是横模腔分别工作在峰值相位加、减 90° 的相位上所测得的图形。CEBAF采用该方法测到了84fs(rms)的束团长度。

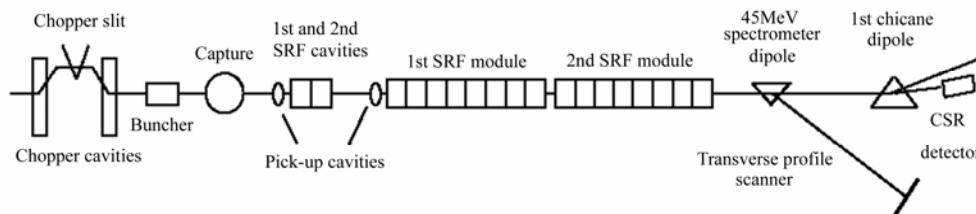


图4 CEBAF注入器布局^[17]
Fig4 Block diagram of CEBA injector

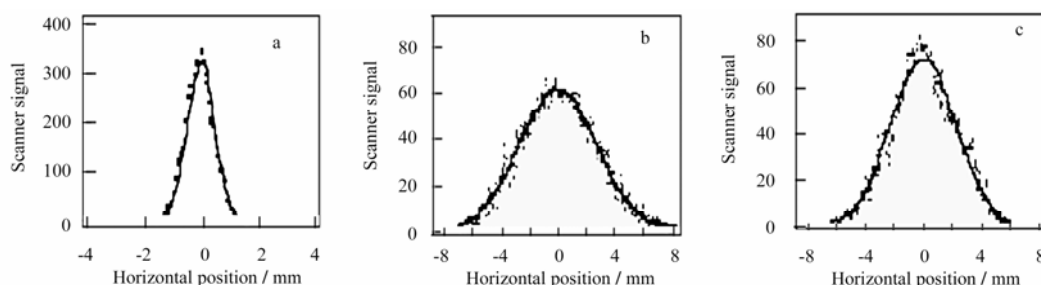


图5 CEBAF测得的水平截面尺寸^[18]
Fig.5 CEBAF horizontal profile measured by the wire scanner^[18]

该方法可以直观地测量束团长度,进一步的卷积分析也能得到束团的具体时间结构,并且时间分辨率可以做到几个飞秒,它适用于任意横向分布和纵向分布的束团,只要满足条件:束团的原有动量偏差与加速腔所引起的动量偏差相比,可以忽略不计。但这就对束团的能散提出了很高的要求,所以在某些加速器中这种方法是不适用的。另外,测量中需要用到额外的加速段,造价昂贵、操作繁琐,且不能实现在线监测,所测得的也只是平均束团长度(rms),不能实现单个微束团测量。而且这种方法将毁掉束团,使这些束团无法再使用,所以一般用在直线加速器中。

1.5 电光晶体法^[19,20,21]

该方法是利用某些晶体的电光效应来测量的。所谓电光效应就是某些晶体在电场的作用下其折射率将会改变。在电场作用下的折射率为:

$$P = \epsilon_0 [x_1 E + x_2 E^2 + x_3 E^3 + \dots]$$

其中, $x_1 E$ 为一次电光效应(Pockels effect); $x_2 E^2$ 为二次电光效应(Kerr effect),最常用到的是一次电光效应。经过晶体后的线偏振光在电场的作用下会成为椭圆偏振光,椭圆度正比于电场强度;对于相对论电子束,可以认为其正比于束团的纵向电荷密度。其结构如图6所示。这种方法可以测量ps、fs

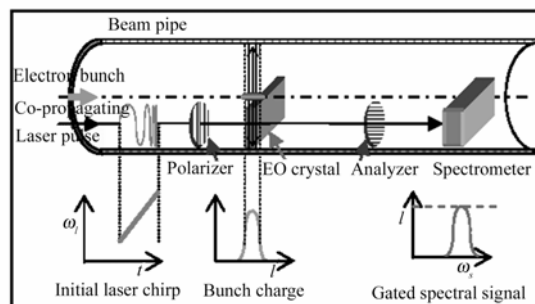


图6 电光晶体测量方法结构图^[20]
Fig.6 In the longitudinal geometry the electric field from a bunch modulates the polarization in an electro optic crystal and gates the transmission of a co-propagating, chirped laser pulse^[20]

级束团,也能实现单个微束团测量。

图7是TESLA的测量结果,其中(a)图是测量到的激光光谱图,S是激光脉冲与电子束团重叠测得的光谱图,S'是激光脉冲超前电子束团50ps测得的光谱图。(b)图是束团长度及形状,它是由光谱图(a)图计算得到的,这里得到的束团长度为 (1.72 ± 0.05) ps(FWHM)。

1.6 谱测量方法

该方法是将束团产生的电磁场取出来,分析其频谱,从而得到束团长度。通常拾取电磁场的方法有:通过波导耦合出电磁场、用电极探测出电磁场,

下面将分别介绍他们。

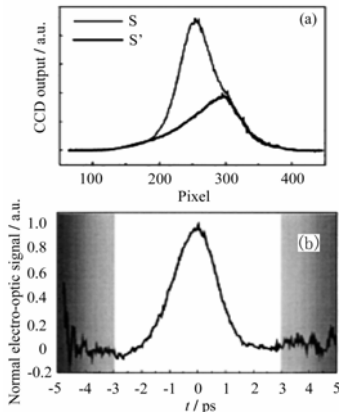


图 7 TESLA 测量结果^[21]

Fig.7 TESLA: Single-shot measurements of the electric field of individual electron bunches^[21]

1.6.1 通过波导耦合出电磁场^[22]

CTF 就曾采用该方法测量束团长度，他们在真空管道上安装了两个波导 WR28 和 WR12，二者的工作频率不同，WR28 为 26.5—40 GHz，WR12 为 60—90 GHz。这样两个波导配合使用可以较全面地了解束团的频谱情况。

图 8 是他们的测量系统框图。它经过两次混频，将频率降下来。第一次与固定频率混频，第二次与扫描振荡器混频，此扫描振荡器受计算机控制，具有一定的频率范围，所以可由计算机控制测出相应的频谱。一般为了减少测量时间，通常是选取一定的频率点来测量。

图 9 是 CTF 的测量结果。图中对该方法测量值、条纹相机测量值、PARMELA 理论计算值进行了比较。从图中可以看出该方法测量值与理论计算值非常接近，它的分辨率可以达到 0.7ps，而条纹相机测量值的误差较大，说明这里的条纹相机分辨率不会好于 2ps。

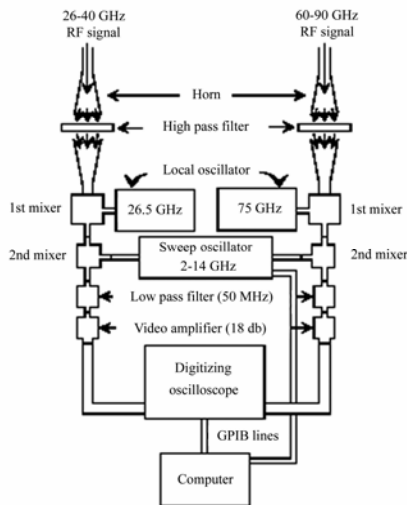


图 8 CTF 测量系统^[22]

Fig.8 CTF Detection system^[22]

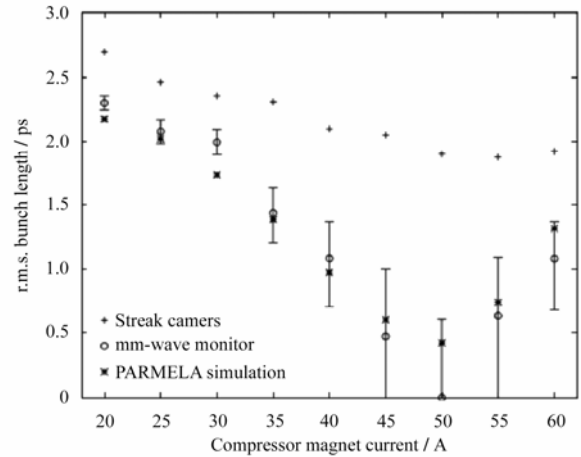


图 9 CTF 测量结果^[22]

Fig.9 CTF Bunch length measurements^[22]

1.6.2 用射频 (Radio Frequency) 技术测量超短束团长度^[23]

意大利的 INFN-LNF 最早提出了采用该方法测量超短束团长度，这种方法也属于频谱技术，它通过计算从谐振腔引出的束流产生的两个不同共振模式的功率比来得到束团长度。这种方法可以测量非常短的束团长度 (1—5mm)。根据公式可以求出束团长度：

$$\sigma_z = c \sqrt{\frac{1}{\omega_1^2 - \omega_2^2} \ln \left(\frac{P_1 P_2}{P_2 P_1} \right)}$$

对于安装在真空管道上的谐振腔探头，见图 10，它的结构并不复杂，加工也不困难。但必须要通过 MAFIA 或其他程序确定其中的 d 、 b 、 L 、 w 、 l 、 h 等参数，一般狭缝 l 的方向是沿着束流方向的，这样可以保证整个系统较小的耦合阻抗，总的长度 L 应是束团周期 (T_0) 的分数，以保证有效的引出共振模式 (TEM)。

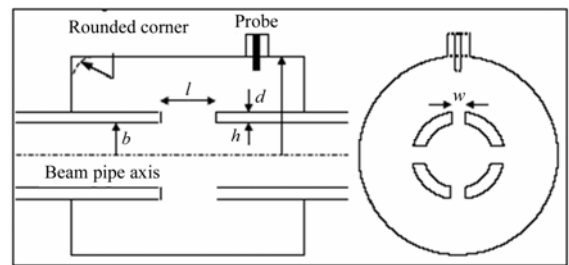


图 10 束团长度监视器^[23]

Fig.10 Sketch of the bunch length monitor^[23]

1.6.3 用电极耦合电磁场^[24,25]

该方法是将拾取电极 (如条形电极、纽扣电极) 安装在真空管道上，拾取束流产生的电磁场，分析其频谱，从而得到束团长度信息。其具体方法是测量出束团频谱的两个频率成分，然后根据以下公式来得到束团长度：

$$\sigma_r = \sqrt{\frac{2}{\Delta\omega^2} \ln \frac{I_1(m_1\omega_0)}{I_2(m_2\omega_0)}} \quad \Delta\omega^2 = (m_2\omega_0)^2 - (m_1\omega_0)^2$$

当所测量的频率越高时，信噪比越高，系统的测量灵敏度越高，所以应该选用尽可能高的频率。但由于频率受到由尾场产生的寄生效应的影响，不可能达到很高的值，一般高频成分选在略低于真空管道截止频率的谐波频率处。

这种方法成本低、结构简单、所需器件也少，测量分辨率也能达到 5ps 级，而且可以实时测量。

在 KEK 的 TRISTAN 主环上采用的就是这种方法。图 11 是它的测量系统的结构原理图，它由衰减器、带通滤波器、混频器、高频信号源等组成。

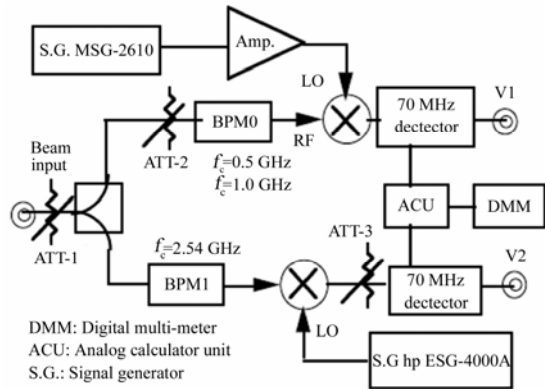


图 11 KEK 测量系统结构原理图^[24]

Fig.11 Block diagram of the bunch-length monitor at KEK^[24]

束团长度将随着加速电压 (V_c)、磁场强度 (wiggler field— B_w) 的变化而改变，图 12 是 TRISTAN 所作的测量值与计算值比较。可以看出两者是很接近的。

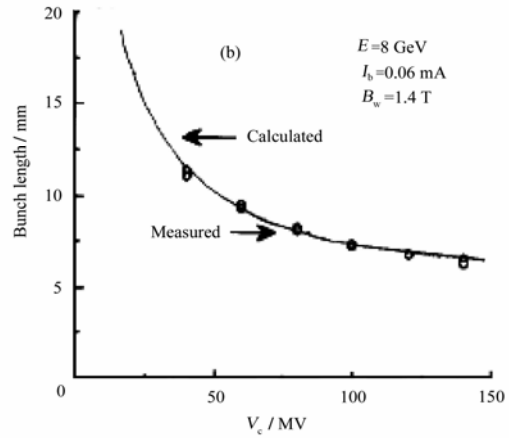


图 12 束团长度作为 V_c 函数的测量与计算值的比较^[25]

Fig.12 Measured and calculated bunch lengths as a function of V_c ^[25]

2 小结

上面介绍了许多加速器束团长度的测量方法，各种方法有各自的优缺点，如表 1 所示。随着加速器技术的不断发展，还将会出现许多更先进的方法。当然不是越先进越好，要根据加速器的特点，选取最适合的方法，这才是最关键的地方。

目前的第三代同步辐射光源的束团长度测量大多数采用条纹相机和对同步光测量的方法来测量存储环中的束团长度，而在自由电子激光直线加速器中也常根据不同部位的不同束团长度采用条纹相机、渡越辐射、光电测量及零相位测量多种方法。越来越丰富的束长测量手段为新型自由电子激光装置和直线对撞机的研究提供了强有力的手段。

表 1 各种加速器束长测量方法比较
Table 1 The comparison between various bunch length measurement methods

Method		Advantages	Disadvantages	Price	Resolution
Time domain	Streak camera	High resolution, fast response, can measure single-shot beam	Costly, can not measure ultrashort beam	Costly	Picosecond
	Ultra-fast photodiode image	Simple equipment, cheaper	Low resolution	Cheaper	10ps
Frequency domain	Martin-Puplett interferometer	High resolution, can measure the ultrashort beam, wide frequency band	Difficultly adjust, slow response, can measure RMS bunch length only	Expensive	Picosecond
	Electro-optic detection	High resolution, fast response, can measure the ultrashort and single-shot beam	Complicated equipment, costly	Costly	Sub-picosecond, femtosecond
	Frequency spectrum analysis	Simple equipment, real-time measurement, cheaper	Low resolution	Cheaper	10ps

参考文献

- 1 Ferianis M. EPAC98, 1998, 159—163
- 2 Chubar O, Masunov E. Proc. of the 1993 IEEE PAC, 3: 2474—2476
- 3 Scheidt K. EPAC96, 1996, 1621—1623
- 4 Fiorito R B, Rule D W. Nucl Instr and Meth, 2001, **B173**: 67—82
- 5 Urakawa J, Hayano H, Kubo K, *et al.* Nucl Instr and Meth, 2001, **A472**: 309—317
- 6 Naumenko G A. Nucl Instr and Meth, 2003, **B201**: 184—190
- 7 谷安佳, 丁原涛, 赵夔, 等. 高能物理与核物理, 2003, **27**(2): 163—168
GU Anjia, DING Yuantao, ZHAO Kui, *et al.* HEP&NP, 2003, **27**(2): 163—168
- 8 Shulga N F, Dobrovolsky S N. Phys Lett, 1999, **A259**: 291—294
- 9 Murokh A, Rosenzweig J B, Hogan M, *et al.* Nucl Instr and Meth, 1998, **A 410**: 452—460
- 10 Fisher A S, Assmann R W. BIW'98, 1998, 471—477
- 11 Kim C, Kim K H, Huang J Y, *et al.* APAC'2001, 421—423
- 12 Clarke J A. EPAC94, 1994, 2: 1682—1683
- 13 Geitz M, Schmidt G, Schmuser P, *et al.* Nucl Instr and Meth, 2000, **A445**: 343—347
- 14 Settakorn C, Hernandez M, Wiedemann H. PAC97, 1997, 2017—2019
- 15 Wiedemann H, Bocek D, Hernandez M, *et al.* J Nucl Mat, 1997, **248**: 374—379
- 16 Akre R, Bentson L, Emma P, *et al.* EPAC 2002, 1882—1884
- 17 Wang D X. Proc of the 18th Intl Linac Conf, 1996, 303—307
- 18 Wang D X, Krafft G A. PAC 97, 1997, 2020—2022
- 19 Bolton P R, Clendenin J E. Nucl Instr and Meth, 2003, **A507**: 220—223
- 20 Bolton P, Dowell D, Krejcik P, *et al.* The 10th Beam Instrumentation Workshop, 2002, **648**: 491—496
- 21 Wilke I, MacLeod A M. Phys Rev Lett, 2002, **88**(12): 124801.1—124801.4
- 22 Braun H H, Martinez C. EPAC 98, 1998, 1559—1561
- 23 Gagliardo B, Mostacci A, Alesini D, *et al.* EPAC 2002, 1834—1836
- 24 Ieiri T. EPAC 2000, 1735—1737
- 25 Ieiri T. Nucl Instr and Meth, 1995, **A361**: 430—435

Accelerator bunch length measurements

HUANG Guoqing^{1,2} YE Kairong¹*1(Shanghai Institute of Applied Physics, the Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)**2(Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)*

Abstract With the improvement of technology, many new accelerator bunch length measurement methods are invented in recent years, such as streak camera, Martin-Puplett interferometer, electro-optic detection, frequency domain method. Each method has its respective advantages, disadvantages and applied domains. A review on various bunch-length measurement methods is given in this paper. At present many large accelerators in the world universally use streak camera to measure bunch length. For beam bunches of ultrashort duration, optic technology and frequency domain method are adopted, and the resolution of some methods can reach to the order of femtosecond.

Key words Bunch length measurements, Streak camera, Martin-Puplett interferometer, Frequency domain

CLC TL506