

合肥光源新的束团截面及发射度测量系统的研制*

孙葆根¹ 郑普^{1,2} 卢平¹ 徐宏亮¹ 王筠华¹ 王季刚¹ 王宝云¹

1 (中国科学技术大学国家同步辐射实验室 合肥 230029)

2 (中国工程物理研究院核物理与化学研究所 绵阳 621900)

摘要 介绍了合肥光源储存环紫外光束团截面及束流发射度测量系统. 本系统采用光学探测, 由光学成像和图像采集处理两大部分组成. 光学成像部分利用光学成像将中心波长366.1nm紫外光1:1成像于CCD探测器上. 图像采集处理部分将CCD探测器采集的视频信号由电缆输出到图像采集卡进行图像采集, 然后由LabVIEW程序进行数据处理获得束团截面尺寸以及束流发射度和耦合度, 最后给出了实验结果.

关键词 紫外光 束团截面尺寸 发射度 耦合度 CCD

1 引言

同步辐射加速器中, 束团截面及束流发射度是表征束流性能的很重要参数. 为了提高束流品质和对束流不稳定性的研究, 必须进行束团截面及发射度的测量. 为此, 国内外很多实验室^[1-6](如美国的SLAC实验室、日本的KEKB、台湾SRRC以及北京高能所的正负电子对撞机等)非常重视束团截面及束流发射度测量系统的研制, 并已投入实际应用.

合肥光源原有一套可见光束团截面及束流发射度测量系统^[7], 在机器调试和机器研究中发挥了重要的作用. 原有束流发射度测量系统安装在B3E铁的A出光口, 由于中国科学院创新项目要在该出光口建立一条与真空系统共用的束流诊断光束线, 所以必须对光路进行重新设计, 同时考虑以下原因: (1) 原系统采用的工作波长是500nm, 由光源引起的偏差较大; (2) 原系统无法兼顾进行200MeV和800MeV的测量; (3) 原系统采用的CCD探测器在工作范围为非线性, 没有进行修正, 产生非常大误差; 因此, 合肥光源进行了一套新的储存环束团截面及发射度测量系统研制^[8]. 新系统安装在与其对称的B3W铁的A出光口, 并在经过大量调研的基础上, 采用同步光的紫外部分进行测量.

2 测量原理

当电子束团在经过二极铁时做弯转运动, 在瞬时运动方向产生同步辐射光, 光束包络反映了发光处的电子束团特性. 光束经水冷铜镜反射, 紫外、可见光和红外光被反射出来, 经光学成像系统, 图像处理系统, 可以测出束团截面尺寸. 选用366.1nm紫外光来进行束团截面及发射度测量. 由光学成像系统引出同步光信号成像到电荷耦合器件(CCD)上, 然后采用NI公司的PCI1409图像采集卡进行图像采集, 由LabVIEW软件编程进行图像采集卡的初始化和数据处理, 计算束团截面尺寸、束流发射度及耦合度等束流参数. 图1给出了测量系统结构框图.



图1 测量系统结构框图

3 光学成像系统设计

3.1 同步光半张角计算

当电子速度接近光速时, 同步辐射将集中在一个

2005-11-03 收稿

* 中国科学院知识创新重大项目(KY4206)和自然科学基金(10275062)资助

沿电子运动轨道的切线方向的光锥内。由于电子在弯转轨道上连续运动，观察者见到的同步辐射光呈扁平的扇状。在合肥光源储存环上，电子能量 $E=800\text{MeV}$ ，轨道曲率半径 $\rho=2.2221\text{m}$ 。同步辐射的临界波长为^[9]

$$\lambda_c = \frac{4}{3}\pi\rho\gamma^{-3} = 2.426\text{nm}, \quad (1)$$

式中 γ 为电子的相对能量， $\gamma = E/m_0c^2$ ， E 为总能量， m_0c^2 为电子的静止能量(即 511keV)。波长为 366.1nm 的同步光半张角为

$$\Phi_{(366.1\text{nm})} = \frac{1}{\gamma} \left(\frac{\lambda}{\lambda_c} \right)^{1/3} = 3.401\text{mrad}. \quad (2)$$

对应于 200MeV 的能量时，同样可得

$$\lambda_c = 155.2\text{nm}, \quad \Phi_{(366.1\text{nm})} = 3.401\text{mrad}. \quad (3)$$

由此可知，在储存环电子能量不同的情况下，对应于同一波长的同步光，它的光锥角是相同的。

3.2 摄像头及光学元件选取

光电工程中电荷耦合器件 (CCD) 技术与图像技术的有机结合，使计量技术向视觉化、智能化迅速发展，它广泛应用于几何测量、遥感测量、精密的尺寸测量以及光波干涉等技术领域。理想的 CCD 探测器件应把最小光量到最大光量产生的信号成比例的收集，但在实际的电路中，许多 CCD 为非线性的，所以必须进行修正才能够精确测量。原系统采用的 CCD 存在非线性，未加修正前测量束斑尺寸较大，如在 800MeV 和 150mA 时，实测束斑尺寸 $\sigma_x=0.6752\text{mm}$ ，远远大于理论值 0.44mm ，经过修正后，实测束斑水平尺寸为 0.4863mm ，与理论值基本吻合^[8]。

综合考虑到国内外加速器所用到的束流发射度测量系统的情况和我们所要求的分辨率以及性价比，初定光路的波长范围为紫外光，采用 XC-EU50 作为最终使用的 CCD 探测器。图 2 给出了其工作波长的相对感光度。选定 CCD 有最大相对感光度的波长作为束团截面测量的工作波长，初步选定为 365nm ，由此加工所需要的滤光片，加工后所得滤光片中心波长为 366.1nm ，波带半宽为 6nm ，中心透过率为 45% 。

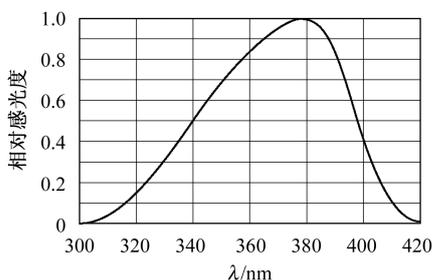


图 2 XC-EU50 型 CCD 感光度

XC-EU50 摄像头有两种工作模式，一种是线性模式，一种是对数模式，选用线性模式，这样避免修正带来的测量误差。图 3 给出了 XC-EU50 型 CCD 在线性模式下灰度值对流强的响应曲线，其中图像卡采用 10bit 的 A/D 转换。对于测量系统光路中其他所有光学元件均采用紫外材料。

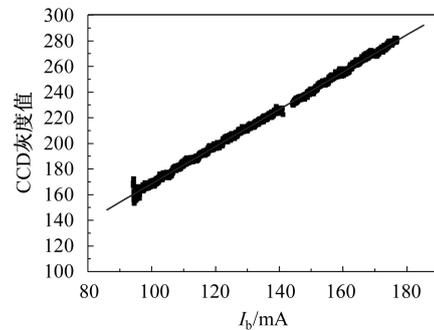


图 3 XC-EU50 型 CCD 灰度值对流强的响应曲线

3.3 光学系统的设计

首先确定系统的放大率，采用 SONY 公司的 XC-EU50 型 CCD 探测器感光靶面为 $7.95\text{mm} \times 6.45\text{mm}$ ，被测束流截面尺寸 $\sigma_x < 1\text{mm}$ ，考虑到束流轨道的变化以及光斑的抖动，按照图像处理需要，感光面尺度应该 $> 6\sigma_x$ ，因此我们选取系统放大率为 1。

光学系统的分辨率为一个重要的参数，系统分辨率较差的情况下会给测量带来很大的偏差，而分辨率过好没有必要而且浪费，根据测量要求的精度初步要求光学系统的分辨率 $< 30\mu\text{m}$ ，实际光学系统测量弥散引起的误差小于 $1\mu\text{m}$ ，球差引起的误差小于 $5\mu\text{m}$ ，而 CCD 探测器的分辨率为 $8.4\mu\text{m} \times 9.8\mu\text{m}$ ，则实际分辨率约为 $11\mu\text{m}$ ^[8]。

已知光源点到出光口距离为 1704.4mm ，出光口孔径为 $F=58\text{mm}$ ，并且根据结构要求，选择一次成像的光学系统，所成像为倒像。这样可以尽量使光学系统的像差降低，所成像放大率为 1。由于是一次成像，为了尽量消除色差我们使用两片透镜成像。由于系统空间结构的限制，我们采用先把光路向下偏转 90° ，然后再用一片反射镜使其偏转为水平。根据以上条件，利用 ZEMAX 程序选择适当的球面半径、透镜厚度，以及材料，进行消像差计算。

在光路中，由于同步光亮度非常大，一定要加适当的衰减滤光片，才能使其光强在 CCD 探测器的工作范围内。

由光通量公式可知，光通量与束团能量成正比，所以选择 1:4 的分光镜。图 4 为光学成像系统图。

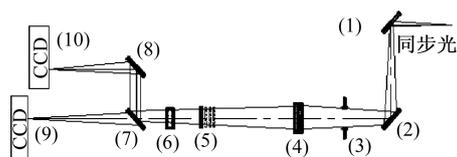


图4 光学成像系统示意图

光学系统包括以下部分.

(1) 水冷反射镜铜镜: 吸收 X 光, 反射紫外线、可见光和红外线, 使同步光向下偏转 90°;

(2) 反射镜: 偏转同步光为水平方向, 光路设计考虑;

(3) 光阑: 利用光阑限制光学系统的水平和垂直孔径, 使光源引起的偏差降低, 水平方向狭缝 21.23mm, 垂直方向狭缝 14.75mm, 由光源引起的水平和垂直偏差分别为 (45.90 μm , 53.82 μm);

(4) 透镜组: 由一块平凸透镜及一块双凹透镜组成, 经过透镜组, 束团截面成像与 CCD 探测器靶面上, 成像比例为 1:1 的倒像;

(5) 衰减滤光片: 用于加大测量的动态范围, 避免在高流强下 CCD 探测器达到饱和, 使用 4 片衰减滤光片, 透过率分别为: 51.6%, 11.27%, 1.17%, 0.1%, 可将其组合使用;

(6) 窄带滤光片: 用来提高测量系统的分辨率, 消除系统色差, 中心波长为 366.1nm, 半宽 6nm, 中心透过率为 45%;

(7) 分光镜: 使光路分为两路, 分别由两路 CCD 接收, 分光比例为 1:4;

(8) 反射镜: 偏转同步光方向为水平, 有利于整个光路结构的稳定;

(9) CCD 探测器 1: 采用 SONY 公司的 XC-EU50 型 CCD, 接收束流在 800MeV 时束斑成像 (CCD 像是去掉镜头, 直接将图像成在 CCD 像素上);

(10) CCD 探测器 2: 采用 SONY 公司的 XC-EU50 型 CCD, 接收束流在 200MeV 时束斑成像.

4 图像获取和数据处理

4.1 图像获取

电子束团在二极铁处产生的同步光经过光学成像系统在 CCD 上产生 NTSC 格式的模拟视频信号, 经电缆传输至 PCI1409 图像采集卡, 由 LabVIEW 程序把读取采集卡得到的图像信号转换为数字信号, 以每秒大约 20 帧的速率输出图像, 其反映了 CCD 上束斑形

状的分布. 程序采用 IMAQ 模块, 对采集卡进行初始化, 建立缓存, 利用循环, 对图像实时显示在弹出窗口处, 同时把采集到的图像转换为一个 10 位灰度表示的二维数组中, 对图像进行进一步的处理.

对于束流在有无 Wiggler 运行模式下 Beta 函数不同的情况, 采用由 LabVIEW 程序调用此时是否有 Wiggler, 然后判断, 分别读取不同的 Beta 函数进入数据处理程序进行发射度计算.

4.2 数据处理

4.2.1 本底扣除及数据平滑

由于 CCD 暗电流以及光路本身和其他杂散光的影响, 所以在对数据处理前必须先进行本底处理. 束团满足二维的高斯分布

$$f(x, y) = A \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_x\sigma_y}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma_x^2} - k\frac{(x-\mu)(y-\nu)}{\sigma_x\sigma_y} - \frac{(y-\nu)^2}{2\sigma_y^2}}, \quad (4)$$

其中 f 为光强, A 为常系数, σ 为束斑半高宽, μ 和 ν 为水平和垂直中心位置, k 为水平和垂直方向耦合系数. 对上式进行一个方向的积分, 则分别得到 x , y 方向的分布

$$f(x) = A \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_x} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma_x^2}}, \quad (5)$$

$$f(y) = A \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_y} e^{-\frac{(y-\nu)^2}{2\sigma_y^2}}. \quad (6)$$

在合肥光源, 由于束团在水平和垂直方向的半高宽均小于 1mm, 而 CCD 感光区域为 7.95mm \times 6.45mm, 对于高斯分布的束团来说在其中心值 5σ 之外, 同步光信号近似为 0, 可以不予考虑. 可以截取图像左上角小区域作为本底, 由于图像采集卡在 x , y 方向上数据点数为 768 \times 494, 所以截取 50 \times 50 的数组求平均作为本底.

由于图像获取输出的为一个二维灰度表示的数组, 对其两个方向分别积分, 可以得到水平和垂直方向的一维分布, 积分的同时也是对数据进行平滑.

图像采集程序把 CCD 感光信号存储于一个二维数组, 必须在全部感光区域中截取远大于本底的部分来进行分析处理, 以减低本底对系统分辨率的影响. 对于任一方向, 可以查找出一维数组中的最大值, 设定最大值的 20% 作为域值, 截取大于该域值的部分作为感兴趣区. 然后对选定的感兴趣区的数组减去上面测量到的本底后分别在两个方向积分, 得出两个一维数组, 由此来进行拟合计算.

4.2.2 束团尺寸 σ_x 和 σ_y 的计算

对公式 (5), (6) 取对数, 可得

$$\ln(f(x)) = -\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma_x^2} + \ln\left(A\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_x}\right), \quad (7)$$

$$\ln(f(y)) = -\frac{(y-\nu)^2}{2\sigma_y^2} + \ln\left(A\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_y}\right). \quad (8)$$

可以对 $\ln(f(x)) \sim x$ 进行一维的二项式拟合, 由所得二次项系数求出 σ_x , 同理可以求出 σ_y . 求出的 σ 并非实际尺寸, 而是对应 CCD 的感光点, 所以必须进行换算. CCD 每个感光点的尺寸为 $8.4\mu\text{m} \times 9.8\mu\text{m}$, 其感光范围为 $7.95\text{mm} \times 6.45\text{mm}$, 成像比例为 1:1, 所以所求 σ 在水平方向乘以系数 0.0084mm, 在垂直方向乘以系数 0.0098mm.

4.2.3 发射度 ε_x 和 ε_y 及耦合度 K 的计算

当测量出束斑 σ_x 和 σ_y 后, 由下式

$$\varepsilon_x = \frac{1}{\beta_x}\sigma_x^2, \quad \varepsilon_y = \frac{1}{\beta_y}\sigma_y^2 \quad (9)$$

可以求出束流的发射度 ε_x 和 ε_y , 其中 β_x 和 β_y 是储存环的 Beta 函数, 可以计算得到. 然后根据下式

$$K = \frac{\varepsilon_x}{\varepsilon_y}, \quad (10)$$

求出两个方向之间的耦合度. 由于每秒 20 帧的采样率, 束流发射度在这个时间段变动范围很小, 在 2 秒内进行平均, 以降低随机性产生的误差.

4.3 前面板分布及数据显示

在发射度测量系统前面板利用一个二维坐标图实时显示束团截面, 亮度高的地方由白色表示, 向亮度低的蓝色过渡, 直观显示束团光强分布. 在束团截面图上方实时显示水平方向束团实测曲线以及拟合曲线, 在束团截面图右方实时显示垂直方向束团实测曲线以及拟合曲线. 在前面板可以直接输入系统数据计算需要的 Beta 函数值, 方便在有无 Wiggler 两种不同模式 Beta 函数改变时进行数据处理. 在观察到感兴趣的图像时, 可以方便的在前面板上手动对感兴趣的图像进行数据存储, 然后由离线处理程序进行数据处理, 拟合求出束斑尺寸、发射度及耦合度. 为了显示束团尺寸、发射度及耦合度随时间变化的历史曲线, 必须建立一个数据缓存, 取 30000 个数据, 在每秒 0.5 个数据的速率下, 可以显示 1000 分钟的数据. 由数据处理得出的 σ_x , σ_y , ε_x , ε_y 和耦合度 K 后, 以时间为横坐标, 所得数据为纵坐标在显示界面中绘制波形图以实时

显示束团尺寸 σ_x 和 σ_y , 发射度 ε_x 和 ε_y 及耦合度 K , 如图 5 所示.

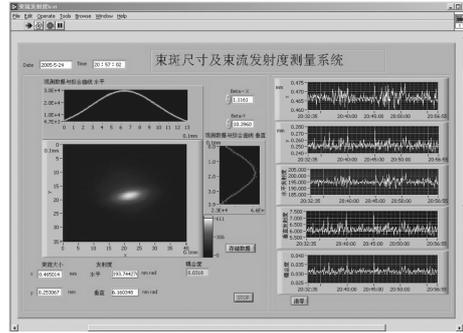


图 5 束团截面及发射度测量系统的显示界面

5 应用举例—束斑尺寸和发射度随流强变化

我们可以实时显示束斑尺寸. 合肥光源运行在 800MeV 时, 由系统通过 LabVIEW 通道采集直流流强检测器采集到的流强信息. 通过顺序结构, 当给出束斑尺寸时, 读出此时的流强值, 绘出束斑尺寸与流强关系曲线. 在测量点处, 有 Wiggler 插入件时, $\beta_x=1.1161\text{m}$, $\beta_y=10.396\text{m}$, 在不同的流强下束斑尺寸和发射度的测量结果如图 6(a), (b) 和图 7(a), (b) 所示. 可以看出, 束斑尺寸和发射度随着流强减小而减小.

由此可得, 合肥光源在有 Wiggler 插入件且流强为 150mA 时, 测量得到 $\sigma_x=0.467\pm 0.011\text{mm}$, $\sigma_y=0.249\pm 0.011\text{mm}$, $\varepsilon_x=195\pm 9.3\text{nm}\cdot\text{rad}$, $\varepsilon_y=5.96\pm 0.54\text{nm}\cdot\text{rad}$, $K=3.06\pm 0.28\%$, 与理论值基本吻合.

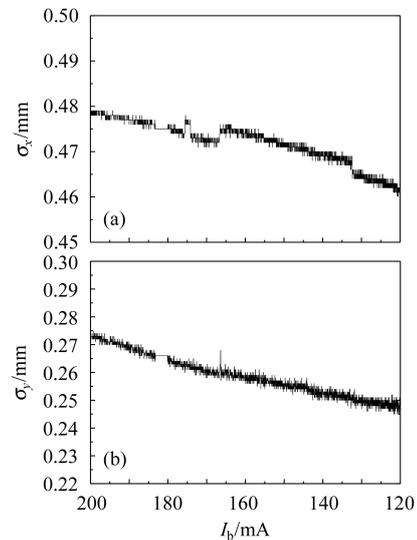


图 6 束斑尺寸随流强变化曲线 (a) 水平方向; (b) 垂直方向.

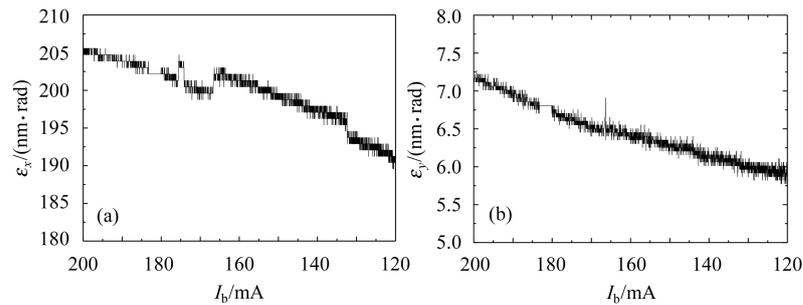


图7 发射度随流强变化曲线
(a) 水平方向; (b) 垂直方向.

参考文献(References)

- 1 Fedotov M G, Filimonov D S et al. Proceedings of EPAC'2002. Paris, France, 2002. 2040—2042
- 2 Flanagan J W, Hiramatsu S et al. Proceedings of APAC'2001. Beijing, China, 2001. 639—641
- 3 Andersson Å, Tagger J. Nucl. Instrum. Methods, 1995, **A364**: 4—12
- 4 HS I C, HUANG T H. Proceedings of PAC'1993. Washington, D.C., 1993. 2465—2467
- 5 Farias R, Jahnel L, LIU L et al. Proceedings of PAC'1999. New York, 1999. 2238—2240
- 6 MA L, ZHAO Z, LIU D K. Proceedings of PAC'1999. New York, 1999. 2140—2142
- 7 FANG Z G, WANG G C et al. Nucl. Instrum. Methods, 1996, **A370**: 641—643
- 8 ZHENG P. Thesis for Master Degree. Hefei: University of Science and Technology of China, 2005 (in Chinese) (郑普. 硕士论文. 合肥: 中国科学技术大学, 2005)
- 9 JIN Y M. Physics of Electron Storage Ring. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 2001 (in Chinese) (金玉明. 电子储存环物理. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2001)

Development of New Beam Profile and Emittance Measurement System for HLS*

SUN Bao-Gen¹ ZHENG Pu^{1,2} LU Ping¹ XU Hong-Liang¹ WANG Jun-Hua¹
WANG Ji-Gang¹ WANG Bao-Yun¹

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

2 (Institute of Nuclear Physics and Chemistry, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

Abstract The paper describes the ultraviolet light beam profile and emittance measurement system for HLS (Hefei Light Source). The system is based on the optical measurement, composed by two functional blocks: optical imaging and image acquisition. The optical imaging system is to form the 1:1 image of the ultraviolet part of SR on the surface of the CCD. The image acquisition system receives NTSC signal from the CCD camera which acquires the image of the ultraviolet part of SR, the signal is processed by a LabVIEW program to obtain the beam information of beam profile size, emittance and coupling between vertical and horizontal directions. Some measured results are also given.

Key words ultraviolet light, beam profile, emittance, coupling, CCD

Received 3 November 2005

* Supported by Knowledge Innovation Project of the Chinese Academy of Sciences (KY4206) and National Science Foundation of China (10275062)