

北京正负电子对撞机同步辐射光脉冲 形状的高分辨率测量

曹忠 刘慰仁 王力列 谢世亮 江力平 丁梅松

(中国原子能科学研究院, 北京)

赵积来 任友来 山冰

(中国科学院西安光机所)

赵正 崔明启

(中国科学院高能物理研究所, 北京)

摘 要

用国产 BWS-5KII 型皮秒扫描相机测量了北京正负电子对撞机 (BEPC) 上极端相对论性运动正负电子束团产生的同步辐射光脉冲的时间结构、光脉冲长度与电子束流强度以及射频源电压的关系。当负电子束流强度由 2mA 增加到 30mA 时, 光脉冲长度由 220ps 增加到 670ps; 在 20mA 电子束流强度条件下, 射频源电压由 250kV 增加到 500kV 时, 光脉冲长度在 500ps 到 700ps 范围内变化。测量系统的时间分辨率为 30ps; 时间刻度误差 $\pm 15\%$, 触发晃动小于 $\pm 200ps$ 。

一、引 言

在 高能电子储存环上, 极端相对论性运动的电子受偏转磁铁的二极场作用产生向心加速度, 同时放出很强的电磁辐射——同步辐射。这是一个有广泛应用前景的新型高亮度辐射源, 它跨越了从红外到 X 射线的光谱区, 并且在真空紫外和 X 射线谱区上是目前最亮的连续谱辐射源。它的发射角范围为 $1/\gamma$ (对于 2GeV 能量的电子, 同步辐射自然发射角仅为 0.00025rad), 因此准直性好。它具有数百皮秒的脉冲宽度, 是动态过程研究中极有用的工具。在材料荧光寿命和时间分辨的吸收和发射光测量研究中, 同步辐射已经得到了广泛的应用。目前同步辐射已成为微电子学、物理、化学、生物、医学的基础研究和应用研究的重要高技术分析手段。目前, 北京正负电子对撞机已建成并投入运行, 它不仅为我国的高能物理和基本粒子研究, 同时也为同步辐射的研究应用开辟了广阔的前景。同步辐射脉冲时间结构的测量是十分重要的。一方面, 为了开发利用这一宝贵资源, 开展各种时间分辨类型的实验工作, 必须了解同步辐射的宽度和时间结构。另一方面, 由于同步

辐射的时间结构直接和高能电子束团长度及电荷分布有关,通过对它的测量可以了解储存环中电子束团的动力学行为及其与加速器运行参数(能量、束流强度和射频源电压等)的关系,为加速器设计和调试运行提供实验依据,因而它也是加速器束流诊断的一个重要组成部分。但是,由于同步辐射脉冲宽度仅数百皮秒量级,要想测量其精细的时间结构必须采用具有极高时间分辨率(好于几十皮秒)的测量手段^[1]。我们用中科院西光所研制的 BWS-5K II 型门控皮秒扫描相机测量了 BEPC 可见同步辐射光的脉冲宽度,并对这种相机的动态时间特性作了检验,本文介绍这一测量的结果。

二、实验原理和装置

2.1 ps 扫描相机简介

ps 扫描相机是目前分辨率最高的时间测量工具(已有 ~ 2 ps 分辨率的定型产品)。它在各种瞬态过程,如窄脉冲激光器的研制、激光聚变、等离子体诊断、强流窄脉冲电子束诊断、荧光衰减时间测量等方面已得到广泛应用。它包括:入射光学系统、ps 扫描变像管、

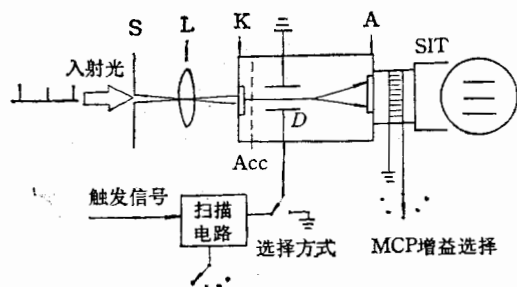


图1 扫描相机原理图

像增强器、SIT 摄像管、电扫描和控制、接触相机和数据读出处理系统。其工作原理简介如下:

图1是 ps 扫描相机的核心 ps 扫描变像管及光学成像系统示意图。当一系列窄的可见光脉冲(例如 100ps 宽, 1 ns 间距)照亮水平狭缝 S(30—50 μ m 宽, 15mm 长), 狭缝像经过转像镜 L(1:1) 成像于高灵敏度 ($>100\mu$ A/lm) 栅网结

构的阴极 K 上, 由于光电效应使阴极发射光电子, 光电子脉冲的宽度直接决定于光脉冲宽度。变像管的阴极、阳极间电位差 -11000 V, 光电子在此电场作用下穿过加速电极 Acc 飞向阳极 A, 中间通过一对扫描偏转板 D。平时在它上面有一定偏置电压, 电子受该偏压影响打到管子其它部件而不打到阳极上。但当一个早于光脉冲(~ 20 ns)的触发信号加到扫描电路时, 一个高压快速的斜坡电压讯号加到扫描偏转板 D 上, 偏转板上电场方向垂直于狭缝, 其极性是部分抵消静态偏压从而使光电子能穿过偏转板到达阳极。由于扫描电压前沿是近似直线变化的斜坡电压, 不同时刻穿过偏转板间隙的光电子将受不同强度的电场作用而落到荧光屏上不同区域, 产生“条纹像”, 实现时间-空间的变换, 时间上的差异转变成荧光屏上垂直于狭缝方向的空间分布。设偏转板的灵敏度 45mm/kV, 斜坡电压前沿的斜率是 1.5kV/ns, 那么 100ps 的时间长度将在荧光屏上产生 6.7mm 宽 15 mm 长(狭缝本身长度)的一个“条纹像”。如果荧光屏有效尺寸为 40mm, 那么满屏量程为 600ps 左右。在 512×512 道数据采集系统中, 每道相应的时间为 $600\text{ps}/512 = 1.2$ ps。

为了提高相机灵敏度, 需要对荧光屏上的弱光进行放大, MCP 像增强器和 SIT 硅靶增强摄像管可提供高达 5000 和 9000 倍的增益, 采用光纤面板作器件间耦合, 可以减

少光传递过程中的损失。数据采集方式有两种,一种是接触式相机,像增强器荧光屏上的图像通过光纤面板直接送到紧贴其上的胶片上,最大限度地利用荧光屏上的光能信号。我们采用的是另一种方法:微机控制的数据采集,图像信号转换由一套工业电视摄像装置来进行。摄像管的扫描系统将光学图像转换成视频信号并由靶极输出,该信号一部分直接输出到监视器,由监视器还原成光学图像,另一部分输出到微机内存,可存盘供分析处理。该方法操作简便,数据处理功能强。如 BWS-5KII 型相机就具有 512×512 二维图像显示和分析系统。

2.2 实验光路介绍

同步辐射光光路详见文献[2]。由反射镜组成的同步光引出通道把可见光引到距发光点七米左右的光学测量室弱光测量装置,用会聚透镜把光束集中到 ps 相机狭缝上以提高光能密度。其它光学参数如下:当 BEPC 运行在 2.8GeV 能量上,平均流强为 66mA 时,可见光中心波长 650nm,张角 2.466mrad,有限张角引起的时间展宽为 84ps ($2.466 \times 10^{-3} \times 1034 \times 33\text{ps/cm}$, 1034cm 是电子轨道半径),400—800nm 可见光张角范围为 2.1—2.64mrad,每个束在辐射点处单位张角内辐射的可见光功率为 0.17W/rad。

2.3 电子线路安排

图 2 是实验装置示意图。分光棱镜把同步辐射光束(光束截面 $\sim 1\text{mm} \times 5\text{mm}$)分成 I 和 II 两束, I 束通过一个焦距为 50mm 的透镜聚焦到扫描相机狭缝上以提高光强度,这样安排可提高光的利用率和实验测量的灵敏度。II 束用作扫描触发信号,该束光被一个快的光电倍增管如 XP2020 或 Hamamatsu 的 MCP 型光电倍增管 R1645U 接收。光电倍增管输出信号经过快放大器 (ORTEC579) 放大后通过单次化门电路被单次化,每次启动相机,斜坡扫描电路仅工作一次。这样安排可以保护扫描电路中高压雪崩晶体管器件。因为 BEPC 储存环

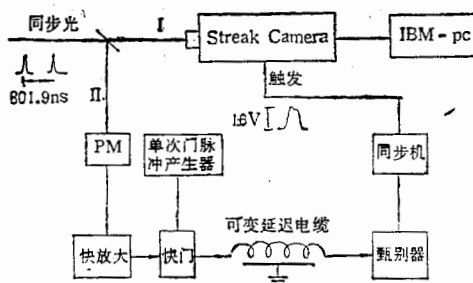


图 2 实验框图

中电子束团频率为 1.247MHz,如没有信号的单次化处理,在这样高的频率下工作,雪崩器件是极易损坏的。单次化门电路由一个单次门脉冲产生器和快线性门组成。揿动按钮,单次门脉冲产生器就产生一个 780ns 宽,前后沿 2ns 的门脉冲,该门脉冲打开快线性门,使来自放大器的脉冲信号可以通过。由于系列脉冲间距(同步光脉冲间距)是 801.9ns,因此只可能有一个脉冲通过,从而实现单次化。该脉冲过门后通过 150m 长的高频同轴电缆 (SWY-50-5-1) 和两个最大范围 63.75ns 的可变延迟器,接到 ORTEC583 恒比甄别器输入端,使用恒比甄别器可以减小光脉冲幅度不稳引起的触发信号晃动。恒比甄别器输出触发同步机产生一个上升时间小于 1ns、幅度 16V、宽度 25ns 的正触发脉冲,该脉冲送到扫描相机的触发输入端启动相机。

触发信号的同步是十分重要的。由于触发信号必须早于被测信号一段时间 (20—

35ns, 视不同扫描档而定), 我们利用储存环电子束团同步辐射光的周期性, 把前一束光信号适当延迟(~ 780 ns)之后触发相机来观察后一束光的脉冲波形。图3显示了它们之间的时间关系。其中同步辐射光经分光棱镜之后分成两束 I 和 II, II 束光引起的电信号经 780ns 延迟后触发相机, 延迟调节精度 250ps。适当调节延迟就可使被测信号通过扫描偏转板间隙时, 高压斜坡扫描电压前沿正好加到偏转板上, 达到同步。

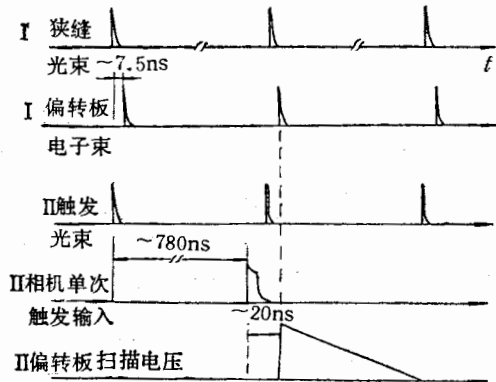


图3 两路讯号时间关系

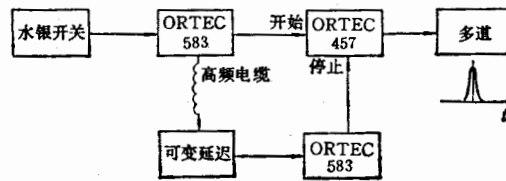


图4 时间晃动测量框图

2.4 长的延迟时间对于时间晃动的影响

在我们的实验装置中, 使用了 150m 长的高频同轴电缆。触发信号经过这么长的电缆延迟后, 其高频分量衰减很大, 此外还易受外界电磁干扰和温度等因素的影响, 这些都会给系统带来较大的时间晃动。为此对于上述延迟触发系统的时间晃动特性作了实验测量, 图4是测量电路框图。水银开关产生每秒 100 次、上升时间 1ns、脉宽 25ns 和幅度 0.70V 的窄脉冲, 通过恒比甄别器 ORTEC583 分成两路, 一路直接送带阈放大的时间幅度变换器 ORTEC457 作“开始”信号, 另一路经 135m 高频同轴电缆和可变延迟线延迟, 送到一个 ORTEC583 甄别器输入端, 其甄别输出作为 ORTEC457 的变换“停止”信号。时幅变换器输出送到一个多道脉冲幅度分析器测量。时幅变换器量程置于 $1\mu\text{s}$, 实验测得上述系统的本征时间分辨 50ps。从所获得的时间谱半宽度可以推出长的延迟对于系统时间晃动的影响。实验测量结果表明当延迟时间短于 700ns 时, 对时间谱影响可以忽略(近似为本征分辨率 50ps), 当采用长电缆加上可变延迟线并且总的延迟时间大于 700ns 时, 时间谱逐渐展宽。但即使在 941ns 总的延迟时间条件下, 由此引起的的时间晃动小于 87ps (按 $\sqrt{100^2 - 50^2}$ 计算), 与扫描相机本身触发晃动 (± 200 ps) 相比是一个小量, 因而不会对测量的捕获几率产生大的影响。后来加速器上的实验测量也证实了这一点(触发晃动小于 ± 200 ps)。

三、实验结果与分析

3.1 相机性能

首先, 利用 BEPC 同步辐射光源对国产 BWS-5KII 型扫描相机 30ps 档的动态性能

作了较全面的鉴定,以确保工作的可靠性,其结果如下:

(1) 相机动态灵敏度优于 $2 \times 10^{-12} \text{J}$. 估算方法如下: 当电子能量 1.6GeV , 流强 66mA 时, 每个电子束团在辐射点处产生同步辐射可见光能量为 $2 \times 10^{-10} \text{J}$, 考虑光路传输损失, 估计相机狭缝上光能量约为 $5 \times 10^{-11} \text{J}$. 在 2mA 平均电子流强条件下实验测到的条纹象的效应本底之比大于 1.5. 此时狭缝上光能量为 $1.5 \times 10^{-12} \text{J}$ 左右, 考虑到光路损失估计的不确定性, 得到相机灵敏度优于 $2 \times 10^{-13} \text{J}$ 的结论.

BWS-5KII 型扫描相机的 MCP 像增强器上加毫秒门控后明显提高效应本底比, 减小拍摄背景, 从而提高测量灵敏度. 实验表明在信号本底比接近 1 的弱光条件下, 加门控选通后信噪比提高四倍, 这一改进使相机具有 10^{-12}J 以上的动态灵敏度. 图 5 是对于 1mA 平均束流强度下所测到的时间-强度曲线. 在不加选通的情况下效应峰完全被湮没.

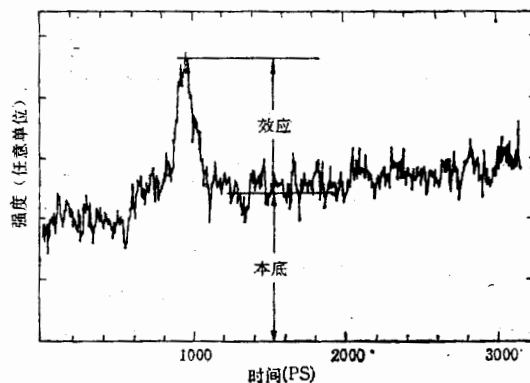


图 5 同步光时间谱 ($I = 1 \text{mA}$, $E = 1.549 \text{GeV}$, $\text{FWHM} = 190 \pm 30 \text{ps}$)

(2) 触发晃动. 使用高速档时造成条纹像在荧光屏上位置的不确定性. 当光脉冲幅度变化小于 10% 时, 测量系统的触发晃动小于 $\pm 200 \text{ps}$. 相机在 40 多小时累计开机过程中, 工作稳定. 在第三档(满屏 3500ps)拍摄捕获几率接近 100%.

适当改变触发信号的延迟时间, 利用测量条纹像在荧光屏上位置变化的办法, 对于第三档扫描速度和满屏量程作了实验直接标定. 具体方法如下: 在同步光强度较强和较稳定条件下(如 $E = 2.2 \text{GeV}$, $I = 15 \text{mA}$), 先在某一延迟线长度条件下(图像位于屏上偏右处), 多次拍摄(23 次)条纹像并进行处理得到时间-强度分布曲线. 得到前沿半高点的位置平均值 P_1 , 然后增加 1ns 延迟, 条纹像在荧光屏上左移, 再重复上述步骤求得新的前沿半高点位置的平均值 P_2 , 由 $1 \text{ns} / (P_2 - P_1)$ 就可求得道宽数值, 并进一步推出满屏量程 ($512 \times$ 道宽) 和扫描速度(屏幕长度/满屏量程). 实验所测到的扫描速度, 满屏量程和道宽值分别为 11.4mm/ns , 3.5ns 及 6.84ps/道 , 标定误差 $\pm 15\%$. 与利用窄的锁模激光器和 F-P 标准具标定值一致. 实验发现, 扫描速度和满屏量程受偏转极上所加偏压大小影响很大, 不同的偏差可使满屏量程在 $2.5-4.5 \text{ns}$ 之间变化, 因此一旦各档扫描标定完毕, 偏压需严格保持不变.

3.2 同步辐射光脉冲测量

图 6 反映了实验测得的同步辐射光脉冲半高宽度随储存环内电子束流强度的变化规律, 电子束能量 1.549GeV , 曲线是对实验点作最小二乘法函数拟合的结果 ($\text{FWHM} = 5.35 \times 10^{-3} I^{0.3723}$). 由图可知当束流由 2mA 增加到 30mA 时, 脉宽由 220ps 左右增加到 670ps . 在 20mA 电子束流强度条件下, 改变射频加速电压 ($250-500 \text{keV}$), 光脉冲宽度在

500—700ps 范围内变化。对于 2.10mA 正电子产生的同步辐射光也作了测量,其宽度与负电子情况相近。

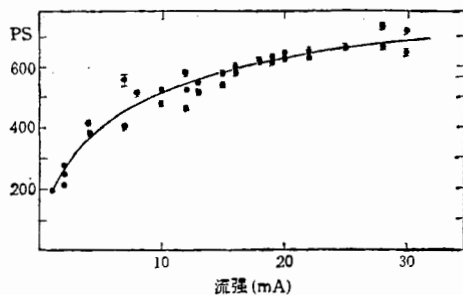


图 6 不同电子束流强度下同步光脉冲半宽度 (FWHM)

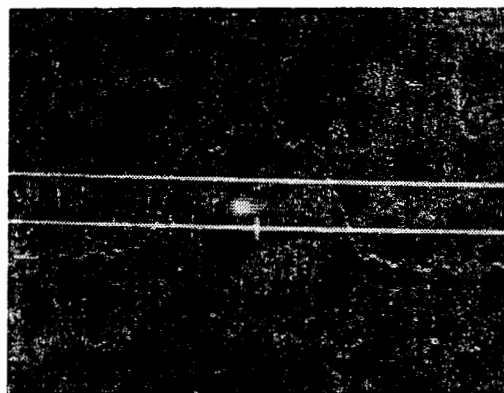


图 7 监视器上条纹象和处理后的时间谱 (10mA, 1.549GeV; FWHM = (580 ± 30)ps)

图 7、8 是电子能量 1.549GeV, 束流强度分别为 10、12.5mA 条件下所拍摄的扫描条纹象、计算机数据处理所取的窗宽(两平行直线间距离)和处理所得同步辐射光脉冲强度随时间的变化。图 9、10 是计算机打印输出的光束时间谱, 其测量条件是电子能量 1.549 GeV, 电流强度相同 (10mA)。

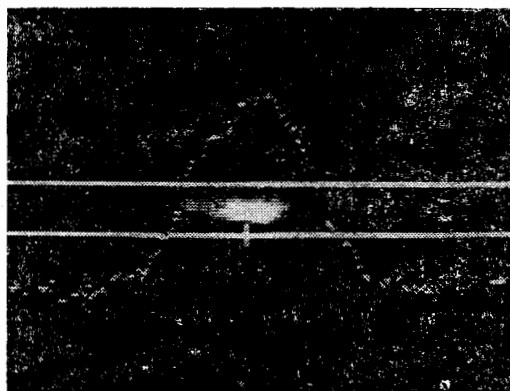


图 8 监视器上条纹象和处理后的时间谱 (12.5mA, 1.549GeV; FWHM = (500 ± 30)ps)

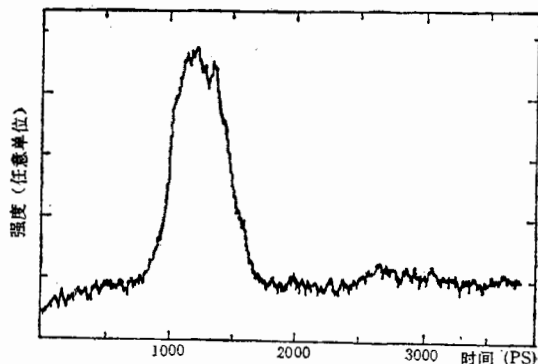


图 9 同步光的时间谱 (10mA, 1.549GeV; FWHM = (500 ± 30)ps)

从上述图分析可知: 1. 同步辐射光脉冲形状变化较大, 有的近似高斯分布(图 8), 有的则偏离高斯分布(图 7、9、10), 形状变化相当快。如图 9、10。两次测量相隔仅一分钟, 它们的形状就有明显的差别。文献[3]报道过电子束团内存在精细结构。因此研究脉冲形状变化的原因是很有意义和必要的。2. 同步光脉冲宽度涨落较大(图 6), 在储存环电子能量为 2.2GeV, 电子束流强度为 15mA 条件下, 七轮测量结果表明脉冲宽度变化 $\pm 15\%$ 。

由于同步光脉冲形状直接反映储存环中相对论运动电子束团的电荷分布, 其半高宽度和电子束团的长度有直接的关联, 因此本实验测量所得同步辐射光脉冲宽度的涨落和精细时间结构, 可能是反映了 BEPC 储存环中相对论电子束团的动力学特性, 反映了电子

束团长度的涨落和存在微结构^[1,2]。在拍摄过程中观察到在同步光脉冲宽度突然变大后,电子束团突然消失的现象,说明电子束团纵向不稳定性的存在。

为了从光束形状推导出电子束团的分布,还需对七米长传输光路所引起的畸变作系统修正。本工作的重点在于验证国产条纹相机用于射频加速器亚纳秒及皮秒诊断的可能性。由于受到时间的限制,对于和加速器电子束团动力学中有关的研究,如束长与射频加速电压的关系,束团纵向不稳定性和精细结构等来不及作系统的测量。但从这初步结果,可以看到极高时间分辨率的扫描相机是研究同步辐射光精细时间结构和储存环电子束团动力学行为的有力诊断工具。它对于提高加速器运行质量,提高束流品质有十分重要意义。今后打算和加速器运行研究人员更加密切配合,进一步开展工作。

在本工作整个过程中,得到了大钊、冼鼎昌、刘世跃研究员的关心和热情支持;唐鄂生、刘吾民和徐文轩同志参加了方案制定讨论。实验中得到 BEPC 加速器运行组、同步辐射室和束测束控组的大力支持和协助,在此表示衷心感谢。

参 考 文 献

- [1] A Ogata, et al., IEEE NS NS-32(3), (1985) 1943.
- [2] 于鸿璇、张琴生等,“BEPC 储存环同步光系统物理设计”,全国第二次“束测与束控”学术交流会议论文集, p. 118, 132 (1988).
- [3] M. BerGher, et al., Nucl. Instr. & Meth., A 237, (1985), 259.

SHAPE MEASUREMENT OF SYNCHROTRON RADIATION WITH HIGH TIME RESOLUTION

CAO ZHONG LIU WEIREN WANG LILIE XIE SHILIANG JIANG LIPING DING MEISONG
(China Institute of Atomic Energy, Beijing)

ZHAO JILAI REN YOULAI SHAN BING ZHAO ZHENG CUI MINGQI
(Xian Institute of Optics and Precision Mechanics)(Institute of High Energy Physics, Academia Sinica, Beijing)

ABSTRACT

By using BWS-5K II streak camera made in China, we have measured the time structure of Synchrotron Radiation (SR) from the relativistic electron and positron beam bunches of Beijing Electron Positron Collider (BEPC). The dependence of SR width to the intensity of beam current and the voltage of RF source was also measured. The main data taken with 30ps time resolution in the experiment are as follows: The length of CR at $E_e=1.549$ GeV is changed from 220ps to 670ps when the average beam current from 2mA to 30mA, the variation range of CR length at 20mA beam current is 500—700ps with RF source voltage varying between 250kV and 500kV. The time calibration uncertainty of the experiment is $\pm 15\%$. The trigger jitter is less than ± 200 ps.

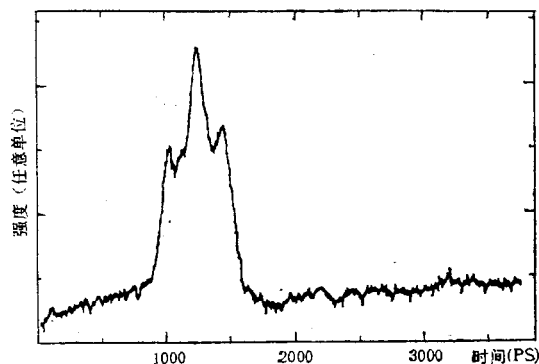


图 10 同步光的时间谱
(10mA, 1.549GeV; FWHM = (520 ± 30)ps)