

# 具有时间分辨能力的高能强流电子束 光学渡越辐射测量系统\*

江孝国<sup>1)</sup> 杨国君 张开志 石金水 邓建军 王远 李成刚

(中国工程物理研究院 流体物理研究所 绵阳 621900)

**摘要** 光学渡越辐射作为高能强流电子束束流参数测量的一种方式, 具有时间响应快、分辨率高等特点, 可以测量电子束的束剖面、发散角、能量等多个参数; 通过电子束束流参数的时间分辨测量则能够了解电子束产生、运输中的问题, 非常有利于加速器的研究与调试. 一种具有时间分辨能力的、利用光学渡越辐射进行高能强流电子束参数测量的系统被建立起来, 并应用到了 18.5MeV, 2.5kA, 90ns 的实际的电子束束流参数的在线测量中, 具有以 10ns 的时间间隔和 3ns 的曝光时间来获得 90ns 内相应的束发射度的变化值的能力, 为加速器的研究提供了又一个强有力的测试手段. 该系统具有的时间分辨能力最高到达 10ns, 一次可以拍摄到 8 幅图像, 最小的曝光时间为 3ns, 图像分辨率为 1376×1035, 幅面可以达到  $\phi 80\text{mm}$  以上.

**关键词** 光学渡越辐射 束流诊断 强流加速器 分光锥 ICCD(Intensified CCD)

## 1 引言

当运动的带电粒子穿过两种不同介质的界面时会产生能量的向外辐射, 辐射能量的分布具有显著的角度分布特点, 这种现象称为光学渡越辐射(Optical Transition Radiation, 简称OTR). 该现象早在 1946 年就由 Frank 和 Ginzburg 从理论上给予了预言, 随着测试技术和设备的进步、加速器研制的需要, 该物理现象从 1975 年才开始用于电子束的束流参数测量和诊断. OTR 能够用于高能电子束的束流参数测量的最根本原因是辐射能量显著的空间角分布特点, 该分布与电子的能量和电子束的发散角度有密切关系. 电子束参数传统的一些测量方法如胡椒屏、荧光靶、丝缝法等还仅限于弱流<sup>[1]</sup>, 有些特征还不容易记录到<sup>[2]</sup>, 且由于采用 CCD 相机记录图像, 所具有的测量能力也是时间积分的<sup>[3, 4]</sup>, 不能够得到与时间有关的过程参数; 针对高能强流电子束的情况, 中国工程物理研究院流体物理研究所的研究工作获得了进展, 在相应的加速器上

获得了 OTR 的显著特征图案, 该结果虽然也是时间积分的, 但却是国内在强流加速器上首次获得的具有 OTR 特征的测量结果<sup>[5]</sup>. 由于 OTR 测量可以提供电子束的重要参数, 并且能够在线测量, 具有较多的优点, 因而成为国际上在强流加速器研究中广泛进行应用和研究的技术, 尤其是具有时间分辨能力的光学渡越辐射测量技术及系统的研究在近几年里得到了重视和发展<sup>[6]</sup>, 而 LANL 在 DARHT 的第一轴的测量工作中建立起了基于 OTR 原理的具有时间分辨能力的束流参数测量系统, 并且获得了具有 10ns 时间分辨能力的测量结果<sup>[7]</sup>. 最近, 中国工程物理研究院流体物理研究所也同样地建立了类似的测量系统, 该测量系统拍摄图像的间隔时间最小为 10ns、最大为 1280ns, 而曝光时间具有 3 档, 最小的曝光时间为 3ns、最大的曝光时间则为 10ns, 具有一次可以拍摄 8 幅图像的能力, 每幅图像的分辨率为 1376×1035; 利用该测量系统, 成功地获得了神龙一号<sup>[8]</sup>加速器具有时间分辨的束流参数变化的情况, 并且观察到了较多过去未观察到的现象, 为加速器的研究提供了又一个强有力的测试手段.

2005 - 03 - 07 收稿, 2005 - 05 - 17 收修改稿

\* 国防科技基础研究基金资助

1) E-mail: j\_xg\_caep@sina.com, j\_xg\_caep@sohu.com

## 2 OTR 测量原理

OTR 光辐射能量以显著的角分布为特征, 利用 OTR 光进行测量正是以此为原理的. 当电子束从真空中射入金属介质时, 产生的后向 OTR 光辐射能量的空间角分布可以用下式表示<sup>[5]</sup>

$$\frac{d^2W}{d\omega d\Omega} = \frac{e^2\beta^2}{16\pi^3\epsilon_0 c} \frac{\sin^2\theta}{(1-\beta\cos\theta)^2}, \quad (1)$$

式中  $\beta$  是电子的相对论速度因子,  $\epsilon_0$  是真空的介电常数,  $\theta$  是 OTR 光相对于电子运动方向的夹角(对于前向光)或电子运动方向在靶表面的反射方向上(对于后向光)的夹角(此时电子入射角为  $45^\circ$ ), 如图 1(a)所

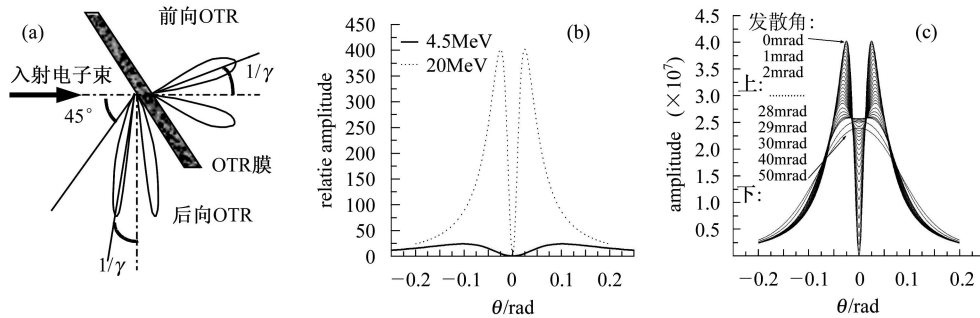


图 1 OTR 光辐射能量的空间角分布示意图

(a) 单膜 OTR; (b) 能量为 20MeV 和 4.5MeV 电子束产生的 OTR 分布; (c) 20MeV 电子束的发散角与 OTR 分布的关系.

## 3 测量系统的结构

图 2(a) 是具有时间分辨能力的光学渡越辐射测量系统在电子束发散角测量中的布局及构成. 该系统利用了后向 OTR 光进行测量. OTR 转换靶采用了镀铝的石英玻璃薄片, 在实验中, 镀铝面朝向电子束运动方向, 且 OTR 靶平面与电子束夹角为  $45^\circ$ . OTR 光收集透镜的设计应以尽可能多地收集光能为原则, 收集孔径角一般为  $1/\gamma$  的 4—5 倍, 同时应兼顾系统测量精度的要求, 这是系统设计的一个关键.

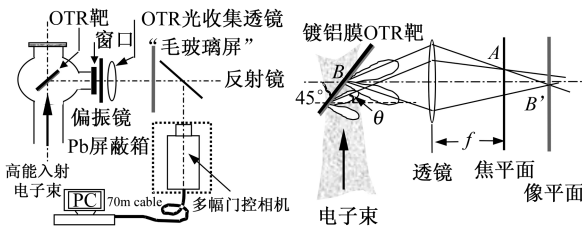


图 2 OTR 测量系统、布局及原理

(a) 测量系统结构; (b) OTR 双成像法原理.

示, 其中  $\theta = 1/\gamma$ ,  $\gamma$  是入射电子的相对论能量因子, 且  $\gamma = E/0.511 + 1$ ,  $E$  为电子能量, 单位为 MeV, 且  $\gamma^2 = 1/(1-\beta^2)$ . 由式(1)可知, 辐射光强度最大值出现的方向在  $\gamma^{-1}$  角度上. 由式(1)还可知, 当电子能量较高时, 渡越辐射将具有显著双峰形状的角分布, 如图 1(b)所示, 因此利用 OTR 测量较高能量的电子束是合适的. 图 1(c) 是电子能量为 20MeV 时, 不同发散角情况下(假设为高斯分布)光学渡越辐射的角分布情况. 明显地, 当发散角达到 30mrad 左右时, 双峰已开始消失; 只有当发散角较小时, 双峰的对比才很明显, 所以, OTR 又主要用于测量发散角较小的电子束.

对于既有能量分布、又有发散角分布的实际电子束的测量而言, 主要依靠理论计算的结果与实验结果的对比来获得电子束的相关参数.

由于 OTR 光具有偏振特性, 为了获得对称分布的 OTR 峰值图案, 选择“垂直观察平面”<sup>[8]</sup>作为测量系统的观察方向. 如果不对 OTR 光的偏振性作选择, 实际上将得不到具有双峰特点的 OTR 图案, 也就无法利用 OTR 特点进行电子束能量的测量了.

为了测量 OTR 光角度分布特点, 直接的方法就是在沿 OTR 靶的观察方向上放置多个探测器, 如美国 SANDIA 国家实验室的相应装置<sup>[9]</sup>, 但这种装置调节复杂、对准直性要求相当高. 由于 OTR 光角度分布的特点, 对某一方向上的辐射光的研究只需要收集该方向上所有辐射光能量即可, 受文献 [3] 所提出的“双成像法”的启示, 在本系统中也采用了类似的方法. 其中像平面成像的方法使来自 OTR 靶上的、以相同的方位角  $\theta$  入射到 OTR 光收集透镜的所有光线都聚焦在焦平面上的一点如 A, 即说明焦平面上的每一点位置对应 OTR 光的唯一的一个方位角, 因此该焦平面上的像分布就代表了 OTR 光的角分布, 以此完成从角度空间分布到二维平面空间分布的转换, 因此由焦平面上的像分布可以推算出电子束的发散角情况;

而像平面成像时需要将偏振片和接收屏(图2中毛玻璃屏所示)都移开, 然后将相机镜头聚焦于OTR靶面上以使来自于同一发光点 $B$ 的所有光线都成像于像平面上 $B'$ 处, 这样可以获得电子束束斑的分布情况, 这就是“双成像法”的原理, 如图2(b)所示. 因此, 首先将接收屏(毛玻璃)放在OTR收集透镜的焦平面处, 以满足“双成像法”中焦平面成像的要求; 而后将分幅相机的物平面准确地调节在接收屏上, 保证相机采集到清晰的图像以获得正确的OTR角分布; 接着将偏振片和接收屏都移开, 然后用相机对OTR靶进行成像以获得束斑. 因此, 上述测量装置可以测量到电子束的重要参数——具有时间分辨的束发散角和束斑分布, 进一步就可以计算得到电子束的发射度.

#### 4 时间分辨能力及其他性能

由于OTR光的产生时间相当短, 因此OTR测量系统的时间分辨能力主要决定于系统中高速分幅相机的幅间间隔时间和曝光时间. 本系统的幅间间隔时间分为10ns, 20ns, 40ns, 80ns, 160ns, 320ns, 640ns及1280ns共计8档, 而曝光时间分为2ns, 5ns及10ns 3档. 表1显示了8路ICCD(Intensified CCD)的实际曝光时间, 虽然每一路之间存在一点差异, 但实际测量结果显示各路本身的曝光时间是稳定的. 在超高速摄影中, 触发延迟及抖动时间是影响系统同步精度的重要原因, 本系统的固有延迟非常稳定、抖动时间也很小, 表2显示了在10ns间隔的情况下, 输入触发信号到第一路ICCD快门打开的延迟时间(包括抖动)的10次测量结果(取一倍标准偏差 $\sigma$ ), 而幅间间隔时间的抖动量也在相同的水平上. 在不同的间隔档位上, 延迟时间依次有约3ns的变化, 但变化量是固定的, 能够准确确定相应情况下的延迟时间, 为其实际应用奠定了基础.

表 1 各路的曝光时间 (ns)

档	1#	2#	3#	4#	5#	6#	7#	8#
2ns	2.98	2.72	2.79	2.77	2.82	2.58	2.77	2.96
5ns	4.49	4.50	4.47	4.48	4.46	4.45	4.18	4.50
10ns	9.50	9.32	9.38	9.50	9.80	9.26	9.64	9.44

表 2 触发延迟时间 (ns)

1	2	3	4	5	6
32.61	32.58	32.65	32.64	32.68	32.68
7	8	9	10	平均值	$\sigma$
32.66	32.60	32.69	32.66	32.65	0.037

#### 5 实验结果

在解决了实验中的具体问题(如强电磁干扰、X光辐射干扰、背景可见光干扰、ICCD增益调整)后, 稳定地以20ns的间隔时间、3ns的曝光时间获得了神龙一号的电子束在约100ns的击靶过程内各时刻(如20ns, 40ns等)所产生的时间变化的OTR图案及束斑分布(图中较大的亮环为OTR靶薄片的边缘, 其中的亮斑为束斑), 典型序列图像如图3所示, 图中纵坐标为图像灰度值, 代表了信号强度, 横坐标为位置, 以像元数计. 结合5910号的束斑测量结果和5922号实验的OTR角分布测量结果, 并将其同理论计算结果比较就可以得到电子束的时间分辨发散角和归一化的边发射度, 如表3所示.

表 3 时间分辨的测量结果

时刻/ns	20	40	60	80	100
发散角/mrad	7.2	6.8	7.1	6.7	7.5
归一化发射度/ ( $\pi$ mm·mrad)	2530	2350	2260	2200	2680

根据表3的测量结果可知, 电子束在40—80ns的性能是较好的, 其发散角相对较小, 而在前沿和后沿的发散角相对大一些, 这与用示波器观察到的现象一致, 但用此法给出了具体数据; 在测量中未获得对称性非常好的OTR图案, 故取了OTR峰的平均值来计算发散角, 而对称性不好可能与下列原因有关: 电子束的Corkscrew运动使电子束轰击OTR靶的角度不是严格的45°; OTR靶放置的角度与电子束不成45°夹角; 偏振片的检偏方向不是严格的“垂直观察平面”等. 因此, 在以后的测量中, 如果要得到对称性较好的OTR图案, 应在实验的布局上进行仔细的调节.

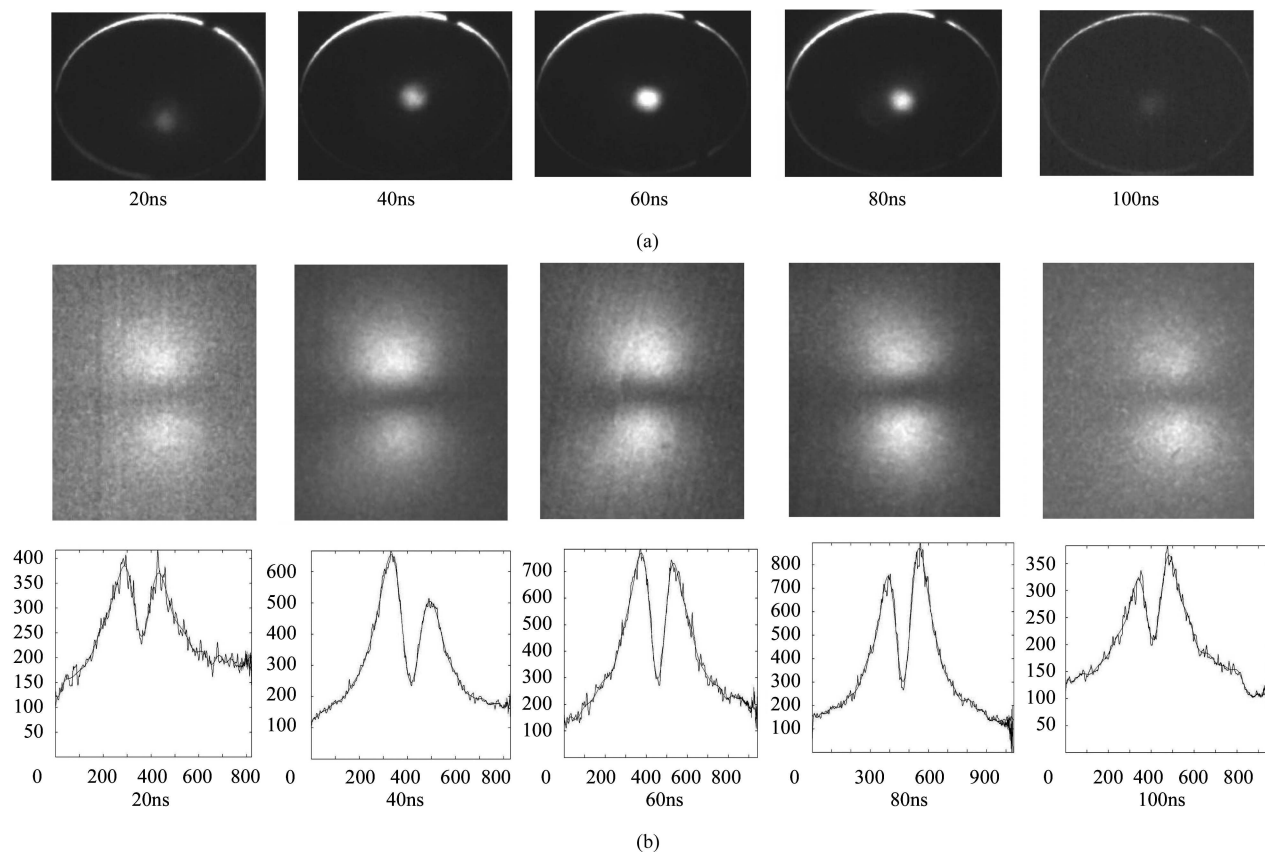


图 3 神龙一号电子束的具有时间分辨能力的测量结果

(a) 5910 号实验时间分辨的电子束束斑测量结果; (b) 5922 号实验时间分辨的 OTR 图案测量结果.

## 6 结论

所建立的具有时间分辨能力的、用于高能强流加速器电子束参数测量的、基于 OTR 原理的测量系统具有稳定的性能, 在高能强流加速器电子束参数的在线测量中成功地得到了应用, 给出了电子束具

体的边发射度数据, 且所获得的数据反映了实际问题, 为加速器的研究提供了又一个强有力的测试手段, 也为具有时间分辨能力的、精度更高的、更灵敏的 OTRI (OTR 干涉) 测量系统的研制奠定基础. 虽然限于测量条件限制, 目前的束斑和 OTR 角分布的测量工作是分开进行的, 但测量结果在加速器稳定的情况下已经非常能说明问题.

## 参考文献 (References)

- ZHANG Y K. Preliminary Research of Real-Time Energy-Spectrum Analysis Based on Optical Transition Radiation. Thesis of Master's Degree, Tsinghua University, 1999 (in Chinese)  
(张贇凯. 基于光学渡越辐射方法实时能谱分析的初步研究. 清华大学硕士学位论文, 1999)
- JIN X. Research of Applying Optical Transition Radiation on Beam Diagnostics. Thesis of Master's Degree, CAEP, 1997 (in Chinese)  
(金晓. 穿越辐射光在束流诊断中的应用研究. 中国工程物理研究院硕士学位论文, 1997)
- GU An-Jia, DING Yuan-Tao, ZHAO Kui et al. High Energy Phys. and Nucl. Phys., 2003, **27**(2): 163—168 (in Chinese)
- CHENG Si-Fu, DING Bo-Nan, XIA Lian-Shen et al. High Power Laser and Particle Beams, 2002, **14**(2): 317—320 (in Chinese)  
(陈思富, 丁伯南, 夏连胜等. 强激光与粒子束, 2002, **14**(2): 317—320)
- YANG Guo-Jun, LIU Chen-Jun, LIN Yu-Zheng et al. High Energy Phys. and Nucl. Phys., 2005, **29**(3): 305—308 (in Chinese)  
(杨国君, 刘承俊, 林郁正等. 高能物理与核物理, 2005, **29**(3): 305—308)
- Sage G P Le. Time-Resolved Emittance Characterization of an Induction Linac Beam Using Optical Transition Radiation: UCRL-ID-153254(LLNL). 2002. 11
- Vermare C, Moir D C, Seitz G J. Optical Transition Radi-

- ation(OTR) Measurements of an Intense Pulsed Electron Beam: LA-UR-00-2064. 2000. 187—189
- 8 DENG Jian-Jun, DING Bo-Nan, WANG Hua-Chen et al. High Power Laser and Particle Beams, 2003, **15**(5): 502—504 (in Chinese)
- (邓建军, 丁伯南, 王华岑等. 强激光与粒子束, 2003, **15**(5): 502—504)
- 9 Richardson R D, Platt R C, Crist C E. Particle Accelerator Conference, 1993, **3**: 2456—2458

## Time-Resolved Measurement System Using Optical Transition Radiation for Electron Beam of High Energy and High Current \*

JIANG Xiao-Guo<sup>1)</sup> YANG Guo-Jun ZHANG Kai-Zhi SHI Jin-Shui  
DENG Jian-Jun WANG Yuan LI Cheng-Gang

(Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China )

**Abstract** The technology using optical transition radiation (OTR) which is a main method for measuring the electron beam of high energy and high current has been developed for the past ten years. OTR characterized by the ultra-fast response, high resolution and capability of measuring both spatial and angular profiles of an electron beam. It also can measure the beam energy and divergence. A time-resolved measurement results of an electron beam produced by linear induction accelerator (LIA) can provide much more detail information so that many problems about the beam transmission can be known well. Such a time-resolved measurement system has been developed recently in our lab and put into operation. It provides an on-line beam diagnostic method for a 18.5MeV, 2kA, 90ns electron pulse. The beam emittance and its variation during the 90ns pulse are obtained in 10ns time interval. This system can capture 8 frame images at one time in the minimum interval period of 10ns while the exposure time is 3ns. The frame interval time is 8 level which changes from 10ns to 1280ns in power of 2 and the exposure time can change in three level of 3ns, 5ns, 10ns. The size of image is 1376×1035 and the object plane size can reach  $\phi 80$ mm.

**Key words** optical transition radiation(OTR), beam diagnostics, linear induction accelerator (LIA) optical splitting pyramid, ICCD(Intensified CCD)

---

Received 7 March 2005, Revised 17 May 2005

\*Supported by Fundamental Research Foundation of National Defense Technology

1) E-mail: j\_xg\_caep@sina.com, j\_xg\_caep@sohu.com