

一种新型光学渡越辐射光学特性的测量方法*

郑艳芳^{1,2}, 陈良益¹

(1 中国科学院西安光学精密机械研究所, 西安 710119)

(2 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要:为了解决理论测量中,光学渡越辐射焦平面的空间角分布与像平面的束剖面光路互相影响,难以同时测量,提出了一种新型的光学渡越辐射光学特性的测量方法.介绍了其光路原理和结构方案,分析了测量结构中的 OTR 镜头、分光棱镜与铅屏蔽结构的技术难点与解决方法.结果表明:系统克服了单功能测量、成像质量差等缺点,在 ICCD 相机上能够同步获得较好的光学渡越辐射的束剖面和空间角分布图案,且基本屏蔽了对图像采集有着强烈干扰的 X-射线等高能辐射.

关键词:光学渡越辐射;光学渡越辐射镜头;分光棱镜;铅屏蔽

中图分类号:O463+.1

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2009)02-371-4

0 引言

电子束流品质的诊断是优化自由电子激光器工作性能的一个重要方面,只有准确测定束流的位置、截面、发射度、能量、脉冲长度等参量,才能使电子束与光束在波荡器中在时间和空间上相互重叠,产生高品质的激光.束流测量技术随着加速器的发展而迅速发展,基于渡越辐射的束测方法便是其中之一.渡越辐射的光分布反映了束流的各种参量,利用渡越辐射的光学段进行束流检测的方法被称为光学渡越辐射方法(Optical Transition Radiation, OTR).

早在 1945 年 Frank 和 Ginzburg 就在理论上预言了渡越辐射的存在,但直至 1975 年 Wartski 等人完成的实验才使它在束流的诊断中得以实际应用^[1].以后这种应用得到迅速发展并不断完善^[2-4],现已被世界各主要加速器实验室所采用,成为 10~100 MeV 能区强流脉冲束流测量的重要手段.中国工程物理研究院流体物理研究所一直在进行 OTR 实验研究^[5],通过 ICCD 相机、图象卡和微机获得从铝靶上发出的关于束流剖面和束流空间角分布信息图像.本文涉及的 OTR 测量光机系统是根据其实验研究的需要,利用现有仪器 ICCD 相机等来实现测量 OTR 靶出射光光学特性的功能要求.

1 OTR 原理

运动电荷(或其他无固定频率的源)在不均匀条件下(如在不均匀媒质中或在时变媒质中)运动,会产生渡越辐射(Transition Radiation),在光学波段

的电磁辐射称为光学渡越辐射,最常见的情形是运动带电粒子穿越两种具有不同介电常量媒质的交界面.

在单膜、粒子垂直入射情况下,在前向、后向两个方向产生辐射(图 1).对于介电常量分别为 ϵ_1 和 ϵ_2 的靶面(介质面),以匀速 v 运动的带电粒子 e 发射的渡越辐射在前半球,在 $d\omega$ 单位频率范围, $d\Omega$ 单位立体角内具有的前向辐射强度为^[6]

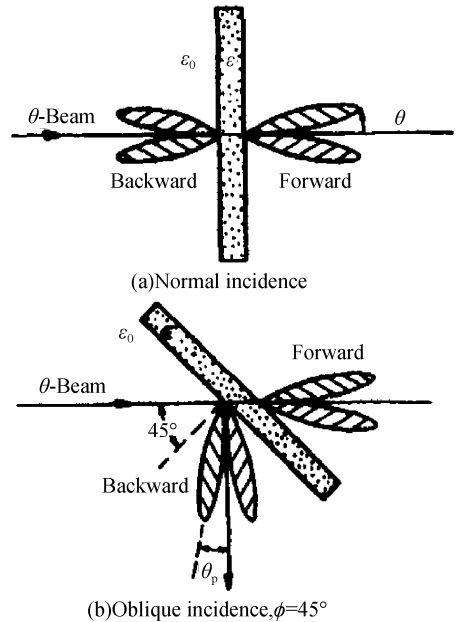


图 1 单膜 OTR
Fig. 1 Single-foil OTR distribution

$$I = \frac{d^2W}{d\omega d\Omega} = \frac{e^2 \beta^2}{\pi^2 c} \frac{\sin^2 \theta \cos^2 \theta \sqrt{\epsilon_2}}{(1 - \beta^2 \epsilon_2 \cos^2 \theta)} \cdot \left| \frac{(\epsilon_1 - \epsilon_2)(1 - \beta^2 \epsilon_2 - \beta \sqrt{\epsilon_1 - \epsilon_2} \sin^2 \theta)}{(1 - \beta \sqrt{\epsilon_1 - \epsilon_2} \sin^2 \theta)(\epsilon_1 \cos \theta + \sqrt{\epsilon_1 \epsilon_2 - \epsilon_2^2} \sin^2 \theta)} \right|^2 \quad (1)$$

式中: θ 为辐射光与粒子轨迹方向的夹角, μ_0 是真空的导磁率, c 是真空中光速, β 是粒子的相对论速

* 国防科技重点实验室基金(51448030105ZK1801)资助
Tel: 029-88887548 Email: winnerfang@tom.com
收稿日期: 2007-09-21

度(v/c). 在相对论极限下($\beta \approx 1$), 对于中高能粒子从真空射向金属介质($\epsilon \gg 1$)的辐射且方向性较好($\theta \leq \pi/2$)的情形, 式(1)化简为

$$I = \frac{d^2 W}{d\omega d\Omega} = \frac{e^2 \beta^2}{4\pi^2 c} \frac{\sin^2 \theta}{(1 - \beta \cos \theta)^2} \quad (2)$$

OTR 的光强分布有许多重要特性. 令式(2)对 θ 导数为零

$$I = \frac{d}{d\theta} \left(\frac{\sin^2 \theta}{(1 - \beta \cos \theta)^2} \right) = \frac{2 \sin \theta \cos \theta}{(1 - \beta \cos \theta)^2} - \frac{2\beta \sin^3 \theta}{(1 - \beta \cos \theta)^3} = 0$$

由上式可得: $\beta = \cos \theta \approx \sqrt{1 - \theta^2}$, 即 $\theta \approx \sqrt{1 - \beta^2} = 1/\gamma$. I 取极大值, 辐射分布的峰值位于 $\theta \approx 1/\gamma$ 处. 其中: γ 为洛仑兹因子. 通过类似的讨论可知, 粒子从介质向真空无论是垂直入射还是斜入射, 光学渡越辐射的主方向就是粒子运动方向, 其光强分布有许多重要特性, 本文主要研究光学渡越辐射束剖面 and 空间角分布的光机测量方法.

2 系统光路原理与结构

2.1 光路原理

图 2 为测量光路示意图.

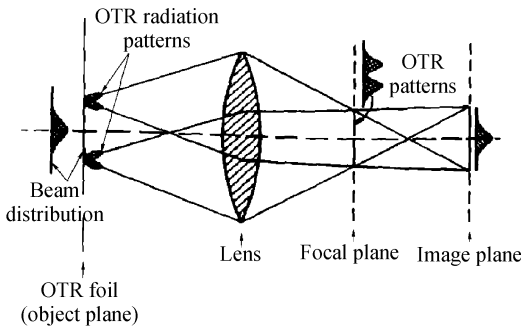


图 2 光学渡越辐射成像原理图

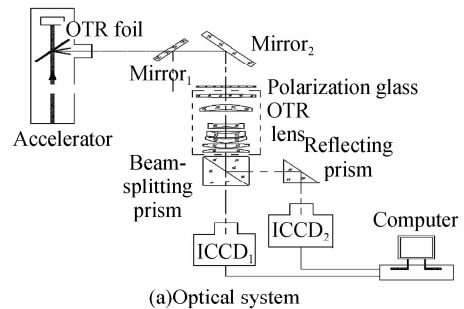
Fig. 2 Schematic diagram of OTR beam path

电子打在渡越辐射转换靶上, 产生渡越辐射. 通过一片凸透镜后, 不同位置的光被会聚在像平面的不同位置上, 而不同方向的光被会聚在焦平面的不同位置上, 这样, 就可以从像平面上得到束剖面图像, 在焦平面得到渡越辐射的空间角分布图案. 实际测量中, 焦平面的测量必然影响像平面测量的光路, 使得两者不能同时进行.

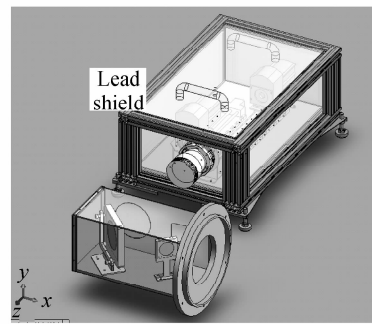
2.2 结构方案

测量束剖面 and 空间发散角分布的布局如图 3. OTR 辐射转换靶与电子束流成 45° 角放置, 电子束打在靶上后, 在垂直于束线方向产生 OTR 光. OTR 光经过导光反射镜^[7]、偏振镜、OTR 镜头之后, 在焦平面形成径向角图案, 在此处放置一块毛玻璃, 通过毛玻璃的散射将此图案转变成实像, 放置在后焦平

面上的 ICCD₁ 拍摄毛玻璃处的 OTR 光的空间角分布图像, 然后传输到计算机的图像采集卡, 据此推演出束流的角散和能量; 后经分光棱镜^[8]与反射棱镜, 放置在 OTR 镜头 1:2 成像的像平面位置上的 ICCD₂ 测量束斑大小和位置, 得到束流截面.



(a) Optical system



(b) Mechanical system

图 3 OTR 测量系统

Fig. 3 Schematic diagram of OTR measuring system

检测反射镜主要是用于导光反射镜、OTR 镜头、成像棱镜与 ICCD 相机装调, 以保证镜头光轴与导光反射镜出射光的光轴重合, ICCD₁、ICCD₂ 轴向移动时与镜头光轴同轴, 并且 ICCD₁、ICCD₂ 的接收面始终垂直于光轴. 因为纯铅很软, 所以铅屏蔽层为三层板结构, 两边各为 5mm 钢板, 中间为 5mm 铅板, 三者使用铆钉连接来加强整体的强度, 并在 ICCD 相机四周围成一个铅屏蔽箱体结构.

3 结构难点与分析

3.1 OTR 镜头

系统对 OTR 镜头的要求极高, 镜头焦距 185 mm, 有效口径限制不得小于 100 mm, 是一个大口径镜头; 同时要获得束剖面 and 空间角分布图案, OTR 镜头既要求实现无穷远成像, 又要求有限距离 1:2 左右成像. 另据使用要求, 系统结构限制了镜头的后截距(镜头后表面到后焦面的距离), 使其必须大于 100 mm. 所以, OTR 镜头的结构相当复杂, 给光学、机械设计增加了一定难度.

OTR 靶面出射光经过偏振镜、OTR 镜头、分光棱镜, 具有相同入射角的光线汇聚于镜头焦平面上的同一点, 如图 4(a), 与靶面成 α 角的光线汇聚于 A 点, 与靶面成 β 角的光线汇聚于 B 点. 将 ICCD₁ 相

机放置在 OTR 镜头后焦面上,就可以得到 OTR 靶面上出射的不同角度光线的分布特性,即空间角分布图案。

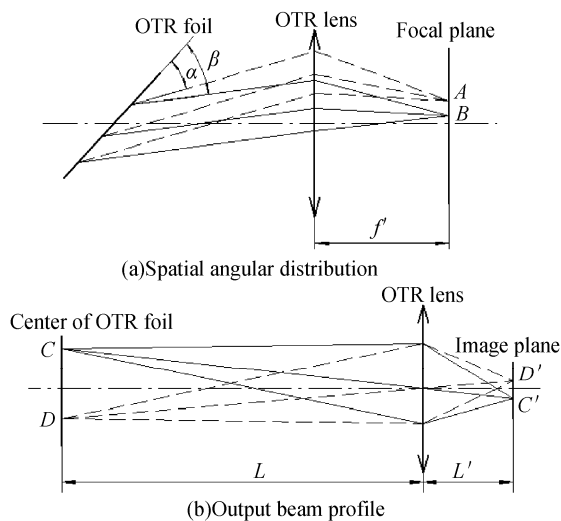


图 4 OTR 镜头光路图
Fig. 4 The beam path of OTR lens

对于 OTR 靶面中心位置,经过偏振镜、OTR 镜头、分光棱镜、反射棱镜等在有限距离 1:2 左右成像,如图 4(b),C 点对应成像于 C'点,D 点对应成像于 D'点. ICCD₂ 相机放置在 OTR 镜头 1:2 左右成像的像面位置,就可以得到 OTR 靶面上出射的束剖面图案。

3.2 分光棱镜

测量中,焦平面的测量必然影响像平面测量的光路,若在光路中倾斜插入一定厚度的光学平板来进行分光来满足试验要求,将带入很大的像散,并且难以补偿;所以将倾斜的光学平板用分光棱镜代替,解决了光学大像差问题。

3.3 铅屏蔽

为了减少 X-射线等高能辐射对增强型 CCD 的干扰,提高成像质量,需将 CCD 放置在铅屏蔽箱中. 图 5 给出了在 8 MeV 加速器束流参量测量实验中,CCD 在无铅层防护和有铅层防护下的成像情况^[4]. 从图中可以看出,使用 10 mm 和 15 mm 厚的铅层

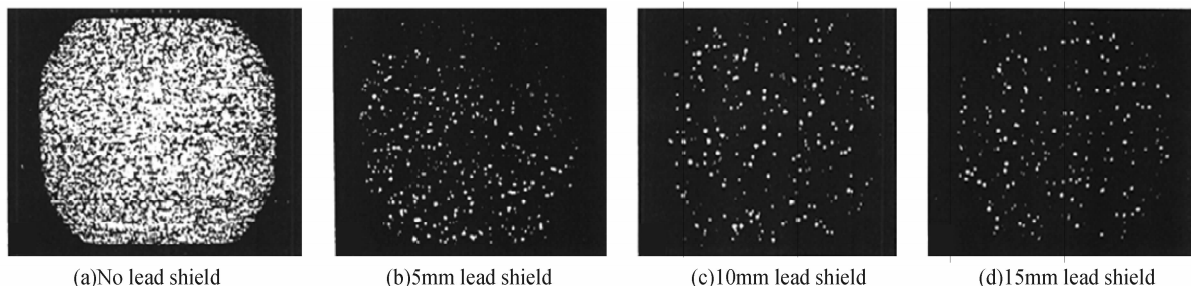


图 5 CCD 在无铅层防护和有铅层防护下的成像情况
Fig. 5 CCD imaging situations with and without lead shield

的防护效果相差不多,这说明已基本将高能辐射屏蔽掉了,其他的干扰是由别的因素造成的。

图 6 是美国劳斯阿拉玛斯国家实验室获得的单膜与双膜 OTR 的空间角分布、束流点原始图片^[9]. 从图中可以看出,单膜实验空间角分布图案具有“猫

眼”形状特性,双膜实验在第二层膜上的空间角分布图案呈对称形状;当束半径最小时,电子束在实验中的测量位置有束腰,因此聚焦在 OTR 膜上的束剖面在 x 轴方向比较狭窄。

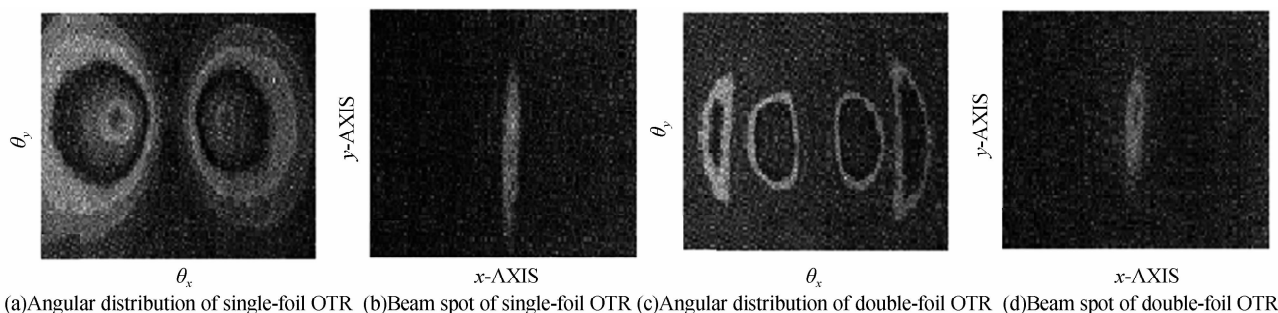


图 6 单双膜 OTR
Fig. 6 Single-foil and double-foil OTR

4 结论

为了测量 OTR 靶出射光的束流剖面 and 束流空间角分布信息图像,OTR 测量光机系统利用 OTR

镜头、分光棱镜与铅屏蔽结构克服了理论中的单功能测量、成像质量差等问题. OTR 镜头作为大口径镜头,并且需要实现无穷远成像和有限距离 1:2 左右成像两个功能,结构上相对来说比较复杂. 为了提

高成像质量,减少 X-射线等高能辐射对增强型 CCD 的干扰,在实验装置周边加铅屏蔽箱是非常重要的.在光学设计中加入了分光棱镜,不但实现了焦平面的空间角分布图案测量与像平面的束剖面测量两者同时进行测量,并解决了光学大像差问题.

OTR 方法作为能谱测量的手段先进而实用,并且单膜、双膜、多膜方法各有所长,其准确度依次提高,实验设备复杂程度也依次增加.实际应用中需要根据不同的要求设计不同的实验设备,并且要注意影响到影响 OTR 方法测量能谱的实际问题,这需要参考有关文献和在实验中继续去探讨.

参考文献

- [1] WARTSKI L, ROLAND S. Interference phenomenon in optical transition radiation and its application to particle beam diagnostics and multiple-scattering measurements [J]. *J of App Phys*, 1975, **46**(8):3644.
- [2] FIORITO R B, RRLE A H. Optical transition radiation measurements of the Los Alamos free electron laser driver[J]. *IEEE*, 1989, **CH2669**:65-67.
- [3] ZHU Li-hua, NIE Yi-you, LÜ Bai-da. The concept of the beam width and comparison of its different definitions [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(10):1476-1478.
朱莉华, 聂义友, 吕百达. 光束束宽概念和不同定义束宽的比较 [J]. *光子学报*, 2005, **34**(10):1476-1478.
- [4] JIN Xiao. Research of applying optical transition radiation on beam diagnostics[D]. Beijing:CAEP, 1997.
- 金晓. 穿越辐射光在束流诊断中的应用研究[D]. 北京:中国工程物理研究院, 1997.
- [5] YANG Guo-jun, ZHANG Zhuo, CHEN Si-fu, *et al.* Research of transition radiation on intense electron beam diagnostics[J]. *High Energy Physics and Nuclear Physics*, 2005, **29**(3):305-310.
杨国君, 张卓, 陈思富, 等. 渡越辐射在强流电子束诊断中的应用[J]. *高能物理与核物理*, 2005, **29**(3):305-310.
- [6] LI Quan-feng, YANG Xiao-lin, HU Yu-min. The application of optical transition radiation in electron energy spectrum diagnosis[J]. *Atomic Energy Science and Technology*, 1998, **32**(5):395-401.
李泉凤, 杨晓林, 胡玉民. 光学渡越辐射在电子束能谱测量上的应用[J]. *原子能科学技术*, 1998, **32**(5):395-401.
- [7] HUI Bin, LI Jing-zhen, PEI Yun-tian, *et al.* Integrated analysis of optical and mechanics in larger aperture catadioptric optical system [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(7):1117-1119.
惠彬, 李景镇, 裴云天, 等. 大口径折反射式光学系统的光机结合分析[J]. *光子学报*, 2006, **35**(7):1117-1119.
- [8] SHI Meng, WU Fu-quan. The principle design and performance analysis of two-way symmetric splitting angle beamsplitting prism[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(3):439-441.
史萌, 吴福全. 双向分束角对称的偏光分束镜设计与性能分析 [J]. *光子学报*, 2006, **35**(3):439-441.
- [9] FELDMAN R B, LUMPKIN A H. Developments in on-line, electron-beam emittance measurements using optical- transition radiation techniques[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, 1990, **A296**:193-198.

A New Optical Characterists Measurement for Optical Transition Radiation

ZHENG Yan-fang^{1,2}, CHEN Liang-yi¹

(1 Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China)

(2 Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Received date: 2007-09-21

Abstract: In order to solve the problem that the paths of angular distribution at focus plane and beam spot at image plane can not be measured at the same time, an advanced measurement of optical transition radiation was proposed. The light path principle and the machine structure were introduced. The technical difficulties and resolvent of OTR lens, the beamsplitting prism and lead shield were analyzed. The results show that the system overcomes single function measure and the bad imaging. The better pictures of angular distribution and beam spot can be obtained synchronously on ICCD cameras. The high power radiations such as X-rays disturb the pattern collection intensively, and are mostly shielded.

Key words: Optical transition radiation; OTR lens; Beamsplitting prism; Lead shield



ZHENG Yan-fang was born in 1978. She received the B. S degree from Changchun Institute of Optical and Fine Mechanics in 2002. Now she is a M. S. degree candidate at Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, and her research mainly focuses on optical engineering and optical design.