

文章编号: 100124322(2004)0921215204

利用光学渡越辐射进行强流束诊断^X

杨国君^{1,2}, 刘承俊², 林郁正¹, 陈思富², 张卓²

(1. 清华大学 工程物理系, 北京 100084; 2. 中国工程物理研究院 流体物理研究所, 四川 绵阳 621900)

摘 要: 描述了光学渡越辐射用于束流诊断的理论依据, 介绍了利用光学渡越辐射对 18MeV, 2.7kA 的强流脉冲电子束进行诊断的实验方案。在解决了在强流束测量中强背景干扰等问题后, 获得了光学渡越辐射的特征图案, 据此测量了强流脉冲束的剖面、能量、发散角和发射度。初步的实验结果表明, 光学渡越辐射方法是强流束诊断的一种有效手段。

关键词: 光学渡越辐射; 束流诊断; 直线感应加速器; 束剖面; 发射度

中图分类号: O463.1

文献标识码: A

当匀速运动的带电粒子通过介质交界面时, 界面库仑场会改变, 在库仑场重建的过程中, 一部分能量辐射出来, 这种辐射被称为渡越辐射。位于可见光波段的渡越辐射被称为光学渡越辐射 (Optical Transition Radiation, OTR)。1946 年 Ginzburg 从理论上预言了渡越辐射, 从 1975 年开始用于束流诊断^[1], 近十多年来受到了国际上各大加速器实验室的广泛关注。作为一种束流诊断工具, 它具有空间分辨率高、时间响应快、多参数同时测量、对束流影响小、装置简单等特点, 能够测量束剖面、发散角、发射度、能量、束流的宏脉冲长度和微脉冲长度等多个参数, 因此在国外加速器领域得到了比较广泛的应用^[1~3]。

在国内, 清华大学、中国工程物理研究院等单位在过去十年中曾经进行过这方面的研究^[4~6], 利用光学渡越辐射测量了束剖面, 结合磁分析器测量了能谱。但这些工作都是在弱流加速器上进行的, 在流强达到几个 kA 的强流加速器上, 产生了许多新的问题, 例如: 可见光背景很强; X 射线背景严重干扰接收系统的正常工作, 并在图像上产生很强的噪声, 甚至能完全淹没有用信息; 转换靶的镀膜层容易被烧穿。为此, 必须探讨克服这些问题的方法。

利用光学渡越辐射的特征图案 (包括单膜双峰图案和双膜干涉图案), 一方面可以确认观察到的辐射是否是光学渡越辐射, 另一方面可以测量束流的能量和发散角, 进而得到发射度, 本文在这些方面做了探讨, 并取得了初步的实验结果。

1 诊断的理论依据

在束流诊断中, 一般采用金属薄膜作为 OTR 的辐射转换靶。束流穿过膜时, 在膜的前后均会产生 OTR 光, 如图 1 所示。其中前向光的主方向就是束流传输的方向, 后向光的主方向是束流在膜表面的反射方向。比较方便的用法是把膜与束流成 45° 放置, 这样就可以在束流的垂直方向进行观测。

渡越辐射具有偏振性。定义观测平面是带电粒子的速度方向和渡越辐射的主方向所决定的平面, 则观测平面上的渡越辐射只有平行于观测平面的偏振分量, 不在观测平面上观测的渡越辐射既有平行分量, 又有垂直分量。

束流情况下, 定义主观测平面为零发散角电子的观测平面。由于实际电子相对于主观测平面可能有很小的偏离, 因此主观测平面上的渡越辐射偏振分量既有平行分量, 又有垂直分量, 但平行分量远大于垂直分量。

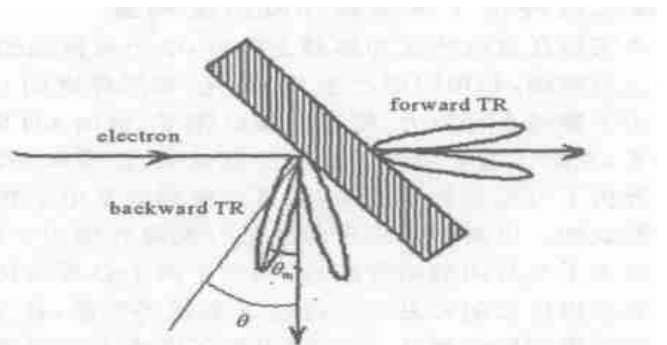


Fig. 1 Sketch of one foil OTR angle distribution

图 1 单膜光学渡越辐射空间角分布示意图

X 收稿日期: 2004203201; 修订日期: 2004203226

基金项目: 国防科技基础研究基金资助课题

作者简介: 杨国君 (1976—), 男, 博士研究生, 从事加速器技术研究, 清华大学工程物理系; E2mail: ygj00@mails.tsinghua.edu.cn.

渡越辐射具有独特的空间角分布,当介质的介电常数很大时,相对论性的单个电子产生的渡越辐射的空间角分布可以表示为

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

式中: β 是电子的相对论速度因子; θ 是相对于渡越辐射主方向的角度; e 是电子电量; ϵ_0 是真空介电常数; c 是真空光速。

对(1)式求极值可知,渡越辐射具有双峰形状的角分布。光强度最大值处的角度 $\theta_m = 1/\beta$,这里 β 是入射电子的相对论能量因子,如图1所示。

实际的束流具有发散角,渡越辐射角分布的完整公式也远比(1)式复杂。束流发散角的分布符合高斯分布,这在已经进行的切伦柯夫双成像法实验中获得了验证。因此,可以利用蒙特卡罗抽样,计算出束流情况下渡越辐射的角分布。图2是电子能量为20MeV时,不同发散角情况下光学渡越辐射平行分量的角分布情况。

从图2可以看出,随着发散角的增大,双峰分布逐渐变平。如果知道了双峰的形状,根据曲线拟合就可以反推出束流的发散角,同时还可以得到束流的相对能量。

电子能量为20MeV时,文献[7]指出,OTR方法测量发散角的精度约为1mrad,文献[8]指出,OTR方法测量能量的精度约为0.25MeV。

可以利用光信息处理中透镜的傅里叶变换特性,在透镜焦平面获得OTR空间角分布信息。在光路中放置一片消色差的凸透镜之后,物方光线只要方向相同,经过透镜后都将会聚到像方焦平面的同一点上,从而由焦平面的像,获得连续的OTR空间角分布信息。

束流的归一化边发射度的表达式为

$$n = 4 \sqrt{x^2 + x'^2 - xx'} \quad (2)$$

式中: x 与 x' 分别为 x 方向的坐标和发散角。轴对称束在束腰处可以简化为

$$n = 4 x_{rms} x'_{rms} \quad (3)$$

因此如果在束腰处测量,在得到束剖面和发散角之后,就可以得到发射度。

2 强流脉冲电子束剖面和发射度测量

本实验在直线感应加速器上进行,电子束流强约2.7kA,能量约18MeV。辐射转换靶是厚度为0.5mm的镀铝石英玻璃,利用铝层产生OTR光,铝层厚度约0.5 μ m。实验中曾经选用过镀铝的麦拉薄膜作为辐射转换靶。由于靶的直径较大,靶表面难以绷平,这时OTR的光子产额很低。采用石英玻璃镀铝的方案以后,靶表面很平,克服了一个问题。经过反复试验,在采取一定措施以后,实验中遇到的问题都得到了较好的解决。

分析了可见光背景的来源,其主要部分是电子在石英玻璃内部产生的切伦柯夫光,经过测量靶室内壁多次反射形成的。以对测量靶室内壁进行发黑处理为主要措施,加上其它手段,使可见光背景降低到可以接受的水平。加工了全封闭的铅屏蔽盒,只开了两个必要的孔:正前方<15mm的观测孔和正后方的测试线孔。利用光学反射镜可以反射可见光而透过X射线的性质,在光路中加入反射镜。这样,X射线背景得到了明显的抑制。为了避免镀膜层的破坏,实验中采取了两个方面的措施。一方面使镀膜层的厚度尽量小,以减小能量沉积;另一方面增加束流的输运半径。采取措施以后,镀膜层破坏的情况没有再发生。

2.1 实验布局

实验中测量束能量和发散角的布局如图3所示。OTR辐射转换靶与束线成45°角。电子束打在靶上后,在垂直于束线方向产生OTR光。OTR光经过一片焦距为200mm的凸透镜之后,在焦平面形成空间角分布图案,在此处放置一块毛玻璃,通过毛玻璃的散射把这个图案变成实像。CCD成像系统拍摄毛玻璃处的图像。CCD产生的标准视频信号经电缆传输到计算机的图像采集卡。

在束剖面测量中,仅对图3的布局略加变动。去掉了透镜和毛玻璃,通过调整镜头的焦距,CCD成像系统

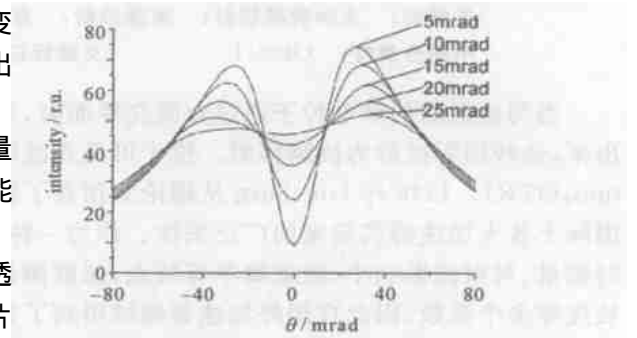


Fig. 2 OTR angle distribution vs divergence
图2 光学渡越辐射角分布随发散角的变化

直接拍摄 OTR 靶处的图像。

2.2 实验结果

在解决了上述问题之后,实验中测量了不同运输磁场下的束剖面图像。图 4(a)是束半径最小时的束剖面图像,此时束流在测量位置具有束腰。束剖面有拖尾现象,这是束流的 Corkscrew 运动引起的。在与图 4 相同的运输磁场配置条件下,进行了束散角测量实验。实验获得的 OTR 角分布图案如图 5(a)所示。

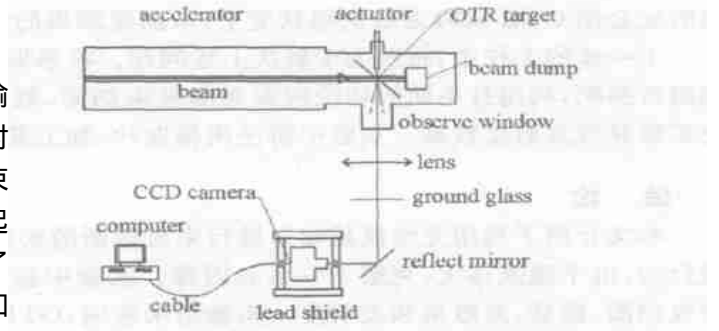


Fig. 3 Experiment scheme of energy and divergence measurement

图 3 束能量和发散角测量实验布局

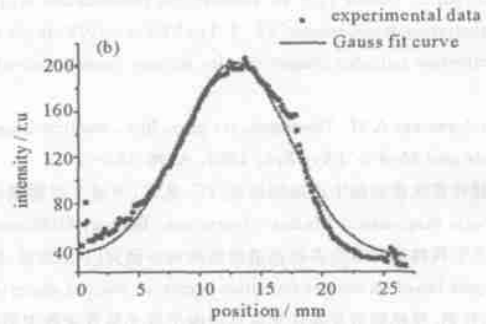
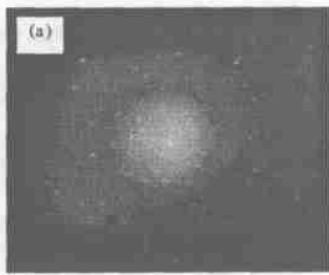


Fig. 4 Beam profile image of LIA and corresponding intensity curve

图 4 LIA 电子束的束剖面图像及相应的强度分布图

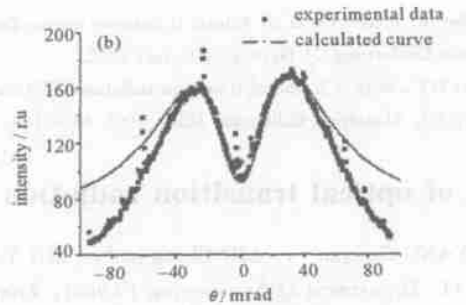
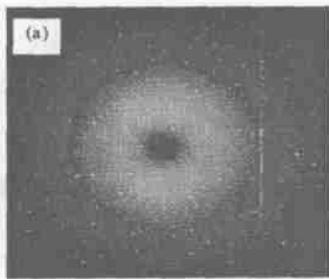


Fig. 5 OTR angle distribution pattern of LIA beam and corresponding intensity curve

图 5 LIA 电子束的 OTR 空间角分布图案及相应角分布曲线

3 数据分析

图 4(b)是图 4(a)垂直方向的强度分布及其高斯拟合曲线,可以看到束剖面基本符合高斯分布。由高斯拟合曲线,得到束腰处的均方根半径为 4.53mm。图 5(b)是图 5(a)对应的双峰曲线与模拟计算得到的双峰曲线的对比图,曲线中的毛刺是 X 射线噪声。模拟计算时,通过调整能量和发散角的取值,使计算曲线与实验曲线相吻合。最后取的条件是能量 18.7MeV,束流在 x 方向的均方根发散角为 8.1mrad。可以看到,实验曲线和计算曲线在中心吻合得很好,实验曲线的两边比计算曲线下落得更快,这是由于光路的有限接收角造成的。因此利用图 5(a)的 OTR 特征图案,得到束流的平均能量 18.7MeV,束流在 x 方向的均方根发散角为 8.1mrad。加速器能量刻度系统给出的束流能量为 18.55MeV,和用 OTR 测得的能量值很接近。

由于已经把束流调节到束腰,根据(3)式,可以利用测量的数据估算束流的发射度。计算中要注意的是从图 4 测量得到的是 r_{rms} ,而(3)式中出现的是 x_{rms} ,要根据轴对称束坐标投影关系 $x_{rms} = r_{rms} / \sqrt{2}$ 进行转换。计算得到归一化边发射度的数值为 $3.9 \times 10^3 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ 。与用其它方法得到的发射度值相比,这里获得的发射度数据偏大,出现偏差的可能原因主要有如下几方面:实验是加速器调试间隙进行的,束流未处于正常工作状态;束剖面的测量和发散角的测量不是在同一发实验中进行的;光路中没有使用偏振片,偏振方向垂直于主观测平

面的光会使 OTR 双峰曲线的形状变平,从而使测得的发散角偏大;模拟计算中没有考虑能散的影响。

下一步的工作中,将致力于解决上述问题。将采取的主要措施是利用一边打毛,一边镀铝的石英薄片作为辐射转换靶,利用打毛面的切伦柯夫光测量束剖面,利用镀铝面的 OTR 测量能量和发散角,这样可以在同一发实验获得发射度数据。实验中将使用偏振片,加上其它措施,尽量避免双峰曲线变平的现象,提高测试精度。

4 结 论

本文介绍了利用光学渡越辐射进行束流诊断的初步实验。实验是在 18MeV, 2.7kA 的强流脉冲电子束上进行的,由于流强很大,克服了一系列困难。实验中获得 OTR 的特征图案——单膜双峰图案,据此测量了束流剖面、能量、发散角和发射度。实验结果表明,OTR 方法是强流束诊断的一种有效手段。

参考文献:

- [1] Wartski L, Roland S, Lasalle J, et al. Interference phenomenon in optical transition radiation and its application to particle beam diagnostics and multiple scattering measurement[J]. *J Appl Phys*, 1976, **46**:3644—3653.
- [2] Rule D W. Transition radiation diagnostics for intense charged particle beams[J]. *Nucl Instr and Meth in Phys Res*, 1987, **B24/ 25**:901—904.
- [3] Feldman R B, Lumpkin A H. Developments in on-line, electron beam emittance measurements using optical transition radiation techniques[J]. *Nucl Instr and Meth in Phys Res*, 1990, **A296**:193—198.
- [4] 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研究生部,1997. (Jin X. Research of applying optical transition radiation on beam diagnostics. Master dissertation. Beijing: Graduate School of CAEP, 1997)
- [5] 张赞凯. 基于光学渡越辐射方法实时能谱分析的初步研究[D]. 北京:清华大学,1999. (Zhang Y K. Preliminary research of real-time energy spectrum analysis based on optical transition radiation. Master dissertation. Beijing: Tsinghua University, 1999)
- [6] 赵镗, 杨学平, 吴钢. 渡越辐射及其在北京自由电子激光装置束测中的应用[J]. *强激光与粒子束*, 1999, **11**(5):531—534. (Zhao Q, Yang X P, Wu G, Transition radiation and its application in beam measurements in Beijing FEL facility. *High Power Laser and Particle Beams*, 1999, **11**(5):531—534)
- [7] Merle E, Mouillet M, Pierret O, et al. Efforts to improve intense linear induction accelerator (LIA) sources for flash radiography[A]. XXI International Linac Conference[C]. Gyeongju, Korea, 2002.
- [8] Vermare C, Doir D C, Seitz G J. Optical transition radiation(OTR) measurements of an intense pulsed electron beam[A]. XX International Linac Conference[C]. Monterey, California, USA, 2000. 187—189.

Research of optical transition radiation on intense electron beam diagnostics

YANG Guojun^{1,2}, LIU Chengjun², LIN Yu Zheng¹, CHEN Si fu², ZHANG Zhuo²

(1. Department of Engineering Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. Institute of Fluid Physics, CAEP, P. O. Box 9192106, Mianyang 621900, China)

Abstract: In this paper, the basic theory of optical transition radiation(OTR) is described. The schemes of experiments on an electron beam of 18MeV, 2.7kA using OTR are presented. In the diagnostics of such an intense beam, some difficulties including strong visible light and X-ray background interference and so on, have been solved. The characteristic pattern of OTR is obtained. With OTR method, the beam profile, energy, divergence and emittance were measured. The preliminary results show that OTR method is an effective way for intense beam diagnostics.

Key words: Optical transition radiation; Beam diagnostics; Linear induction accelerator; Beam profile; Emittance