

相对光谱辐射标准光源—— 合肥 800MeV 电子储存环

唐玉国 王淑荣

(中国科学院长春光学精密机械研究所应用光学国家重点实验室, 长春 130021)

张允武 王秋平 周红军

(中国科学技术大学国家同步辐射实验室, 合肥 230026)

摘要 本文简要介绍了合肥 800MeV 电子储存环同步辐射装置, 对其同步辐射的光谱分布进行了测试评价, 结果表明, 同步辐射的光谱分布实验结果与理论计算值具有较好的一致性。

关键词: 同步辐射; 光谱分布; 标准光源

1 引言

相对论性高能电子在磁场中沿曲线轨道做加速回旋运动时, 沿轨道切线方向发出一种极强的电磁辐射即同步辐射。这种辐射具有可计算的宽广平滑的连续光谱, 辐射覆盖了从软 X 射线到红外的一个很宽的光谱区域, 辐射强度高, 特别在紫外—真空紫外及软 X 射线波段是其他光源所不能及的。因此同步辐射在辐射计量方面得到广泛应用。从五十年代起很多国家对同步辐射进行了系统的实验研究, 并相继利用同步辐射建立了紫外—真空紫外光谱辐射标准^{[1]~[3]}。

1991年12月, 合肥同步辐射装置的正式运转, 为我国利用同步辐射建立光谱辐射标准提供了必要的条件。为此有必要在可见、紫外及真空紫外波段就其同步辐射的“质量”进行测试评价, 本文即分别以石英卤钨灯和 NPL 氙灯为工作标准, 完成了 200—800nm 波段合肥 800MeV 电子储存环光谱分布的测试, 并与理论计算值进行了对比。

2 合肥 800MeV 电子储存环同步辐射

合肥同步辐射光源是以 200MeV 直线加速器为注入器的 800MeV 电子储存环, 表 1 给出了储存环的部分参数。在储存环上有 12 块二极磁铁, 从每块磁铁上可引出两条光束线, 每条光束线至少可建立两个实验站, 分别用于物理、化学、生物学及光刻、显微术、辐射计量等众多科

学研究领域。

表 1 800Mev 电子储存环部分参数

储存电子能量	$E_0 = 800\text{Mev}$
循环束流	$I_0 = 100 - 300\text{mA}$
特征波长	$\lambda_0 = 2.4\text{nm}$
弯转磁铁曲率半径	$R = 2.222\text{m}$
弯转磁铁数目	$N = 12$
磁场强度	$B = 12\text{kG}$

由于相对论效应,具有若干 Mev 的电子,其辐射集中于电子运动方向即轨道切线方向周围极细的光锥内,其辐射呈扁平扇形,沿轨道平行方向上均匀分布,在与轨道垂直方向有一定的发散度。按 Schwinger^[4]理论,同步辐射的辐射光谱分布由下式给出:

$$P_\lambda(\lambda) = 1.406 \times 10^{-3} I B^2 E^5 \left(\frac{\lambda_c}{\lambda}\right)^3 \int_{\lambda_c/\lambda}^{\infty} K_{5/3}(\xi) d\xi, \quad (1)$$

其中 $\lambda_c = 186.4 / (BE)^2$ 为特征波长, I 为束流大小,依表 1 给出的合肥 800Mev 电子储存环参数,由(1)式可以计算出同步辐射的光谱分布,如图 1 所示。

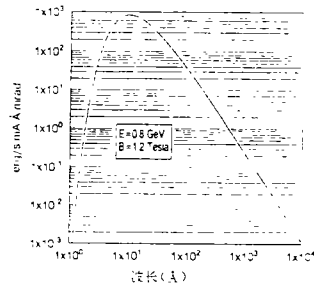


图 1 合肥 800Mev 电子储存环理论光谱分布

3 实验部分

1992 年 6 月在国家同步辐射实验室进行了首次同步辐射与高温黑体辐射之间的对比,传递标准光源为石英卤钨灯,由于光束线窗口为光学玻璃,对比波长范围只在 300—800Mev 之间完成。1993 年 4 月再次进行了对比,此次对光束前端到窗口部分进行了改进,并选用远紫外石英晶体作窗口,对比范围扩展到 200nm,实验装置如图 2 所示。在光束线前端与窗口之间加入一阀门,用涡轮分子泵预抽,使得光束线窗口可以随时更换测试。测试系统包括 Czerney—Turner 型平面光栅单色仪,波长重复性为 0.05nm,探测器为 R928 光电倍增管(日本),光电倍增管输出信号被弱信号放大器放大后,经快速 12 位 A/D 变换,由计算机采集处理,光谱扫描、放大器增益变换、倍增管高压设置均通过 RS-232 接口,在计算机控制下自动完成。

实验中的标准光源为石英卤钨灯和氙灯,在 250—800nm 波段使用中国计量院依黑体辐射标定的 1000W 石英卤钨灯,工作电流 8.50A,200—350nm 波段为英国

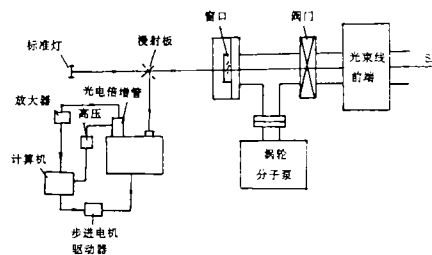


图 2 光谱测量实验装置

国家物理实验室(NPL)依同步辐射标定的氙灯,工作电流 300mA。同步辐射和标准灯的测量通过旋转漫反射板完成。对同步辐射和标准灯分别有:

$$S_s(\lambda) = P_s(\lambda)\alpha(\lambda)$$

$$S_{sy}(\lambda) = P_{sy}(\lambda)\alpha(\lambda)\tau(\lambda)$$

因此有

$$P_{sy}(\lambda) = \frac{S_{sy}(\lambda)P_s(\lambda)}{S_s(\lambda)\tau(\lambda)}$$

其中 $S_{sy}(\lambda)$ 、 $S_s(\lambda)$ 分别为同步辐射和标准灯的光谱响应信号, $P_{sy}(\lambda)$ 、 $P_s(\lambda)$ 分别为同步辐射和标准灯的光谱分布, $\alpha(\lambda)$ 为系统的传递效率函数, $\tau(\lambda)$ 为光束线窗口的透过率。这样在 200—800nm 波段, 分别以石英卤钨灯和氙灯作标准, 测量出合肥 800Mev 电子储存环同步辐射的相对光谱分布。

4 结果与分析

图 3 给出由上述实验装置测得的合肥 800Mev 电子储存环同步辐射的相对光谱分布。实验结果与依 Schinger 理论公式计算结果相比较具有较好的一致性, 最大偏差为 6%。对实验结果产生不确定性影响的因素大致有以下几点:

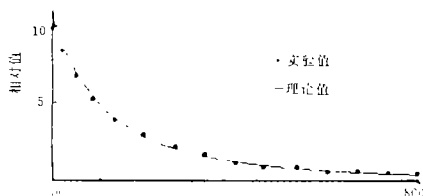


图 3 同步辐射相对光谱分布测量结果

(1) 实验系统固有的测试精度, 如光谱仪的波长重复性, 放大器、A/D 卡及光电倍增管的非线性度, 电源的不稳定性等因素的影响, 通过逐项测试分析, 对实验结果产生小于 1% 的误差影响。

(2) 石英卤钨灯光谱分布的不确定度, 在 300nm 处为 1%, 在 200nm 处氙灯光谱分布的不确定度为 ±2%。

(3) 光束线石英窗口透过率的衰减。在一个实验周期(20 天)前后分别测得透过率, 结果表明, 透过率在短波长变化较大, 最大变化为 1% 左右。

5 结 论

本文对合肥 800Mev 电子储存环同步辐射 200—800nm 的光谱分布进行了测试评价, 从上述分析来看, 同步辐射理论计算公式很好地描述了其光谱分布特性, 可以依电子储存环同步辐射作标准进行光谱仪及未知光源的标定。用同步辐射建立辐射标准的原理很简单, 但由于同步辐射的绝对光谱辐射强度依赖于轨道电子束流大小, 准确地测定电子束流大小还存在很大

困难,这意味照着依同步辐射尚只能得到相对光谱分布,绝对值要依靠黑体辐射标准给出。

参 考 文 献

- [1] Mitchell L. Furst and L. Randall Canfield, *proc. SPIE*, 1992, **1764**: 278—284
[2] P. J. Key and T. H. Ward, *Metrologia*, 1978, **14**: 17—29
[3] M. Kuhne, *proc. SPIE*, 1988, **982**: 326—334
[4] J. Schwinger, *Phys. Rev.*, 1949, **75**: 1912

Relative Spectral Radiometric Standard Light Source —Hefei 800MeV Electron Storage Ring

Tang Yuguo, Wang Shurong

(*Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, State Key Laboratory
of Applied Optics, Changchun 130021*)

Zhang Yunwu, Wang Qiuping and Zhou Hongjun

(*Nation Synchrotron Radiation Laboratory, USTC, Hefei 230026*)

Abstract

In this paper, the Hefei 800MeV synchrotron radiation facility is briefly presented. The spectral distribution of the electron storage ring was evaluated. A good agreement was found between the experimental results and the values predicted by the theory of synchrotron radiation.

Key words: Synchrotron radiation, Spectral distribution, Standard light source