

# 合肥 800 MeV 电子储存环同步辐射特性

唐玉国 李福田

(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 130022)

**摘 要** 以石英卤钨灯作为光谱辐照度标准光源, 测量了在 300~800 nm 波段的合肥 800 MeV 电子储存环同步辐射的相对光谱分布; 并在 405 nm 波长处测量了辐射源的角分布和偏振特性. 在实验误差范围内, 测量结果与理论计算值相符. 相对光谱分布偏差为 1.5%, 角分布和偏振特性偏差小于 5%.

**关键词** 同步辐射, 光谱辐射.

## 1 引 言

为了利用同步辐射建立紫外-真空紫外和软 X 射线光谱辐射计量标准, 从 50 年代起人们就对同步辐射开始了系统的实验研究. Key<sup>[1]</sup> 以黑体辐射的光谱辐射标准研究了 Glasgow 大学 340 MeV 同步辐射, 发现从 350 nm~600 nm 波段同步辐射光谱分布理论值与实验值之间只有 1% 的偏差. Codling 和 Wadden<sup>[2]</sup> 在 550 nm 波长处测量了美国国家标准局 180 MeV 同步加速器辐射, 其角分布和偏振特性的实验值与理论值偏差在 3~5% 左右. 1986 年 Kostkowski<sup>[3]</sup> 等人在 NBS 的 SURF II 上进行了同步辐射与卤钨灯[FEL 标准]光谱辐照度比对, 也获得一致性的结果. Lemke 和 Labs<sup>[4]</sup> 在 220~550 nm 波段用黑体辐射标准研究了 DESR 6 GeV 同步辐射与理论值相比较, 偏差在 ±2% 内. 总之, 近十几年来美、英、西德等国家在利用同步辐射建立辐射计量标准方面做了大量工作<sup>[6~7]</sup>, 取得了很大进展. 本文对合肥 800 MeV 同步辐射在 300~800 nm 波段的相对光谱分布及在 405 nm 波长处的角分布和偏振特性进行了研究.

## 2 实验装置

同步辐射光谱分布测量装置如图 1 所示. 单色仪光栅刻线密度为 600 l/mm, 波长分辨率为 0.1 nm. 实验中光谱带宽取 0.4 nm, 倍增管的输出信号被放大器放大后经快速 12 位 A/D 变换, 由计算机采集、处理. 光谱扫谱、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. 标准光源是 1000 W 石英卤钨灯, 由中国计量院依黑体辐射标定, 工作电流为 8.50 A, 工作波段为 250~2500 nm. 同步辐射光由光束管道通过紫外石英窗

口辐射出来，经漫反射进入单色仪。当漫反射板旋转 90°时可对标准灯进行测量。

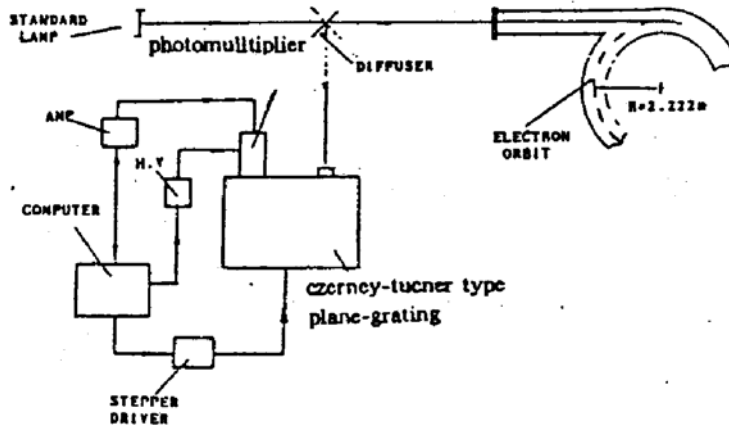


Fig. 1 Arrangement of the optical system for spectral measurement

图 2 给出了测量同步辐射偏振特性和角分布的实验装置。经石英窗口发出的同步辐射光，在距光源点 4 m 处被  $\phi 1$  mm 的圆孔截收，经干涉滤光片后，由光电倍增探测。整个装置可沿垂直方向扫描探测，进行辐射角分布的测量。在圆孔和滤光片之间加一格兰-泰勒偏振器，可进行同步辐射偏振特性的测量。干涉滤光片中心波长为 405 nm，带宽 10 nm，偏振器的工作波段为 300~2500 nm，消光比为  $10^{-5}$ 。为消除束流不稳定性的影响，得到归一化结果，在辐射光束中放置一与光束成  $45^\circ$  角的平面反射镜，同时用另一探测系统接收，作为参考信号。两路信号之比作为最终测量结果。

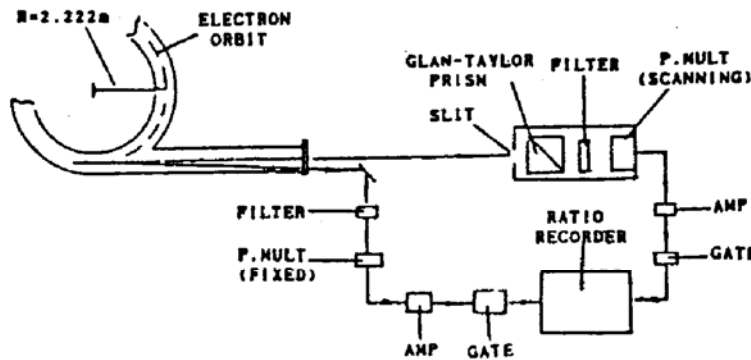


Fig. 2 Instrument utilized for the study of polarization and angular distribution

### 3 实验参数计算

由于相对论效应，具有若干 MeV 能量的电子，其瞬时辐射集中在电子运动方向即轨道切线方向周围极细的光锥内。电子轨道上不同位置发出的辐射呈扁平扇形，沿  $\theta$  方向（观测方向与轨道平面的夹角即垂直于轨道平面方向）有一定的发散度。沿  $\psi$  方向（光束在轨道平面内的张角即平行于轨道平面方向）均匀分布。按照 Schwinger<sup>[5]</sup> 理论计算公式，在圆周轨道上的单电子单位波长、单位弧度（垂直方向  $\theta$ ）所辐射的瞬时功率  $P(\theta, \lambda)$  可表示为：

$$P(\theta, \lambda) = \frac{8\pi e^2 c^2}{3 W_0 \lambda^4} \left( \frac{M_0 c^2}{E} \right)^4 (1 + X^2)^2 \left[ K_{3/2}^2(\xi) + \frac{X^2}{1 + X^2} K_{5/2}^2(\xi) \right] \quad (1)$$

式中  $\xi = (2\pi R/3\lambda)(M_0 c^2/E)^3(1 + X^2)^{3/2}$ ,  $X = (E/M_0 c^2)\theta$ ,  $\theta$  为光束发散方向与轨道平面的夹角。  $K_{3/2}$ ,  $K_{5/2}$  为第二类修正贝塞尔函数。当平均回旋电子束流为  $I$  时，波长  $\lambda$ ，带宽 0.1 nm，

每 mrad  $\psi$  内的平均辐射功率  $P_\lambda(W/A \text{ mrad } \psi)$  为:

Table. 1 the main paramrters of 800 MeV storage ring

Electron energy	800MeV
Current intensity	100~300 mA
Bending radius	2.222 lm
Bending magnet field	1.2 T
Circum fence	66.1308 m
Number of bending magnets	12
RF frequency	204.0 MHz

$$P_\lambda = 1.406 \times 10^{-3} IB^2E^5(\lambda_c/\lambda)$$

$$\int_{\lambda/c}^{\infty} K_{\frac{2}{3}}(\xi) d\xi \quad (2)$$

其中  $\lambda_c = 186.4/(BE)^2$  为特征波长. 合肥 800MeV 储存环的主要参数由表 1 给出.

依据这些参数, 由(2)式得到单位束流的平均辐射功率, 如图 3 所示.

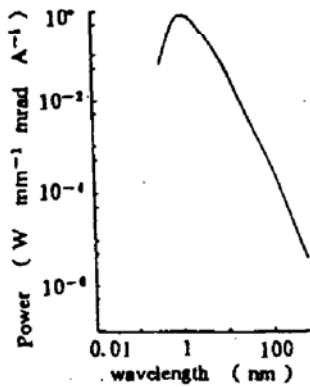


Fig. 3 Power radiated by HESYR as a function of wavelength

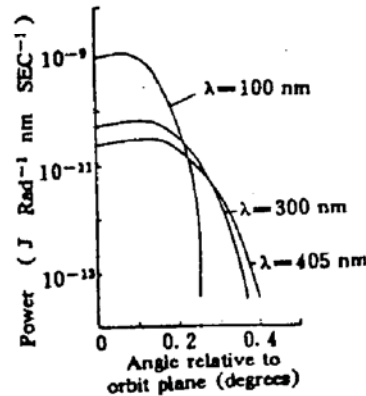


Fig. 4 Power radiation per electron as a function of the observation angle measured relative to the orbit plane

从(1)式可以计算出 800 MeV 同步辐射的角分布, 图 4 给出了几个不同波长下的角分布情况, 可以看出同步辐射限制在很小的垂直发散角内, 其发散程度因波长不同而异. (1)式不仅反映了总辐射功率分布, 也反映了辐射的偏振特性与波长  $\lambda$  和发散角  $\theta$  之间的关系. (1)式后面的括号中, 前一项对应于电矢量方向平行于轨道平面的辐射分量, 后一项对应于电矢量方向垂直于轨道平面的辐射分量. 两个分量的强度之比有如下关系:

$$\frac{I_{//}}{I_{\perp}} = \frac{1 + X^2}{X^2} \cdot \frac{K_{\frac{2}{3}}(\xi)}{K_{\frac{5}{3}}(\xi)} \quad (3)$$

图 5 给出了合肥同步辐射在几个特定波长下  $I_{//}/I_{\perp}$  与发散角  $\theta$  的关系曲线, 随着  $\theta$  的增加, 比值趋近于 1. 同步辐射光是椭圆偏振光, 辐射功率的 75 % 位于平行轨道平面内.

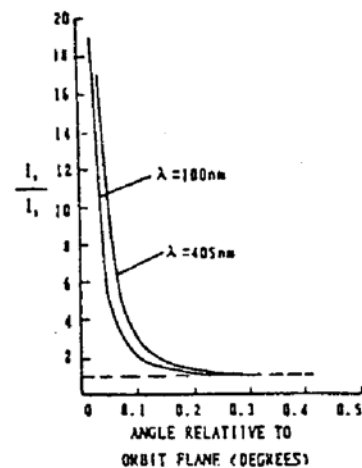


Fig. 5 Ratio of the  $I_{//}$  to  $I_{\perp}$  plotted as a function of angle measured relative to the orbital plane

### 4 实验结果与分析

#### 4.1 相对光谱分布

用图 1 所示的实验装置完成了合肥 800 MeV 同步辐射相对光谱分布的测量. 为了消除电子学系统的漂移, 采用同步辐射-标准灯-同步辐射的测量模式. 采集信号顺序为  $S_{sy}(\lambda) - S_{Lamp}(\lambda) - S_{sy}(\lambda)$ , 以  $[S_{sy}(\lambda) + S_{sy}^*(\lambda)]/2$  作为同步辐射的测量信号  $S_{sy}$ , 其中  $S_{sy}(\lambda)$ 、 $S_{sy}^*(\lambda)$  均为单位束流的同步辐射光谱信号. 则同步辐射的光谱照度分布由下式给出:

$$E_{sy}(\lambda) = \frac{S_{sy}(\lambda)}{S_{Lamp}(\lambda)} E_{Lamp}(\lambda)$$

图 6 给出了 300~800 nm 波段采样间隔为 0.1 nm 的相对光谱分布测量结果. 结果表明测量值与理论值偏差为 1.5%. 实验用的标准灯在 300~800 nm 范围内相对光谱辐照度分布的不确定度为 1~2%; 由于光束线石英窗口的污染等原因, 使得透过率变化约小于 1%; 测量系统的长、短周期的不稳定性小于 0.5%, 得到的理论值与实验值的偏差在实验误差范围之内, 说明在实验误差范围内, 理论值与实验具有很好的一致性.

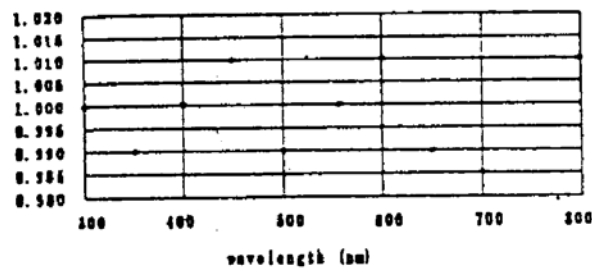


Fig. 6 Ratio of measured and calculated spectral distribution the ratios are normalized at 555 nm

#### 4.2 偏振特性及角分布

图 7 给出了合肥同步辐射在 405 nm 波长处垂直方向的角分布测量结果, 其中实验值在理论峰值处做归一化理. 图 8 给出了偏振特性的实验结果. 从图 8 可以看出, 合肥同步辐射角分布和偏振特性与理论偏差小于 5%. 产生此测量偏差的原因主要有以下几点:

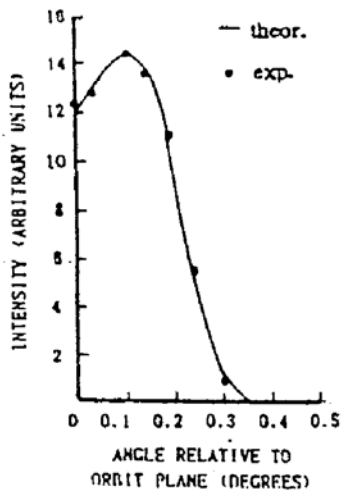


Fig. 7 Comparison of theory and experiment for the intensity radiated as a function of the observation angle measured relative to the orbital plane

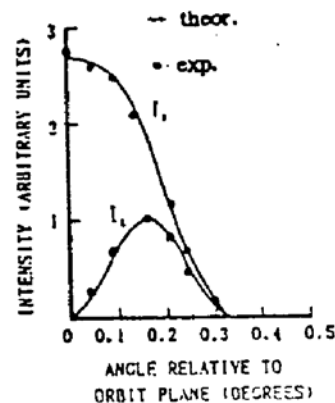


Fig. 8 Comparison of theory and experiment for the intensity radiated in each component of polarization as a function of observation angle measured relative to the orbital plane

1) 电子束流横向尺寸影响: 在电子轨道中的电子束, 其横截面有一定尺寸的, 而理论计算是以单电子为依据的. 把光源发射视为是理想的点源.

2) 石英窗口对偏振特性及角分布特性的破坏: 如果窗口使偏振面发生偏转, 则一部分

平行分量将作为垂直分量的一部分被记录下来, 从而产生测量误差.

### 3) 测量系统的不稳定性.

综合上述因素, 估计对整个测量引入的误差大约在 3~5% 左右.

**结 论** 完成了合肥 800 MeV 同步辐射装置在 300~800 nm 波段内相对光谱辐射的测量和 405 nm 波长处角分布与偏振特性的研究. 结果表明, 在实验误差范围内理论计算与实验结果相符. 作者将进一步把这项研究工作推向更短波长, 为我国利用同步辐射建立辐射计量标准奠定一定的基础.

**致 谢** 本工作是在中国科学技术大学合肥国家同步辐射实验室完成, 得到了张允武教授、张新夷教授的大力支持和帮助, 在此表示衷心的感谢.

## 参 考 文 献

- [1] P. J. Key, Synchrotron Radiation as a standard of spectral Emission. *Metrologia*, 1970, 6(3): 97~103
- [2] K. Coding, R. P. Madden, Characteristics of the "Synchrotron Light" from the NBS 180 MeV Machine. *J. Phys*, 1965, 36(2): 380~388
- [3] Henry J. Koslkowsk *et al.*, Comparison of the NBS SURF and tungsten ultraviolet irradiance standards. *Appl. Opt.*, 1986, 25(8): 3297~3306
- [4] D. Lemks, D. Labs, The Synchrotron Radiation of 6-GeV DESY Machine as a Fundamental Radiometric Standard. *Appl. Opt.*, 1967, 6(6): 1043~1048
- [5] J. Schwinger, On the Classical Radiation of Accelerated Electrons. *Phys. Rev.*, 1949, 75(12): 1912~1925
- [6] W. R. Ott *et al.*, XUV radiometric standards at NBS. *Proc. SPIE*, 1986, 689: 178~187
- [7] Mitchell L. Furst, L. Randall Canfield, UC/VUV radiometric calibrations at SURF I. *Proc. SPIE*, 1992, 1764: 278~284

## Characteristics of Synchrotron Radiation Emitted by Hefei 800 MeV Electron Storage Ring

Tang Yuguo      Li Futian

(Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica, Changchun 130022)

(Received 3 August 1993; revised 20 September 1993)

**Abstract** The relative spectral distribution of synchrotron radiation emitted by Hefei 800 MeV electron storage ring was measured in 300~800 nm range, by using quartz tungsten halogen lamp spectral irradiance working standard source. The polarization and the angular distribution were investigated at 405 nm. Within the experimental error, a good agreement was found between experimental results and values predicated by theory of synchrotron radiation derived by Schwinger. The difference of relative spectral distribution is less than 1.5%, and the angular distribution and the polarization is less than 5%.

**Key words** synchrotron radiation, spectral radiation.