

文章编号: 1007-4627(2003)04-0259-05

康普顿背散射技术对贮存环电子束诊断及其应用*

I 电子束能量的精确测量及光学标准实验站

顾嘉辉, 蔡翔舟, 郭威, 沈文庆

(中国科学院上海原子核研究所核物理室, 上海 201800)

摘要: 简单叙述了采用康普顿背散射技术精确测量电子束能量的技术, 并指出建立辐射标准实验站对精确电子束能量测量的需求。

关键词: 康普顿背散射技术; 电子束能量; 光学标准实验站

中图分类号: TL67 **文献标识码:** A

1 引言

为适应空间科学、等离子体物理、受控热核聚变和软 X 射线激光器等诸多学科研究的需要, 世界各国的研究机构相继开展利用同步辐射建立软 X 射线、真空紫外光谱辐射标准的研究工作, 并取得一系列研究成果。其中德国技术物理研究院 (PTB) 采用 BESSY I (800 MeV)^[1-3] 贮存环产生的同步辐射谱作为主要标准源, 在上面建立相应计量光束线, 配备先进的软 X 射线-真空紫外光谱辐射计, 同时以激光等离子体光源 (LPPS) 和大电流真空阴极光源为传递标准, 将研究工作扩展到软 X 射线波段。以后建立的 BESSY II (1.7 GeV) 贮存环又把研究工作扩展到硬 X 射线区^[4, 5]。美国的 SURF^[6]、日本的 TERAS^[7] 和前苏联的 VEPP-2M 把电子贮存环作为计算的辐射计量光源。美国国家标准技术研究院 (NIST) 利用 SURF II 开展软 X 射线、真空紫外标准光源和探测器定标工作, 建立软 X 射线-真空紫外定标装置, 为美国空间“太阳紫外光谱辐照监测器 (SUSIM)”进行飞行前和飞行后的地面定标。日本电器综合技术研究所利用 600 MeV 储存环上的计量光束线进行软 X 射线、真空紫外光谱标准光源和标准探测器的研究。

此外, 红外同步辐射也越来越引起光谱学家的注意, 着手建立该波段的光谱辐射基准、给出量化数据和需建立相应实验站给出红外光谱辐射基准。国外已有建立在同步辐射源上的近红外光谱辐射标

准, 但没有中、远红外作为红外光谱标准的报导。在我国同步辐射光源上建立光学标准实验站, 来填补我国计量基准上的一些空白, 使计量科学更好地为工业、农业、科学技术和国防服务, 这是我国各同步辐射装置考虑的内容之一。中国科学院上海原子核所正在计划建造第三代同步辐射加速器。

2 电子束能量的精确测量

光谱辐射基准实验站要求提供的基准稳定、准确和可靠。因此要求光源系统能稳定控制电子能量、束流大小和磁感强度等运行参数, 并在光源点准确地测量这些参数。Schwinger 方程^[8]计算弯铁辐射谱光子通量的重要参数是精确的电子束能量, 在特征能量以上光子通量计算强烈地依赖于电子束能量 (对 BESSY II 的 1.7 GeV 电子束得到 X 射线特征能量 2.5 keV)。为了把光子能量扩展到 50 keV, 得到相对误差小于 0.2%, 要求电子束能量具有小于 5×10^{-5} 的相对误差^[4]。

有两种独立技术可以精确地测量电子束能量, 即共振自旋退极化 (RSD)^[9] 和激光光子的 Compton 散射 (BCS)。虽然 RSD 是非常精确和成熟的方法, 但它有两个缺点: 这一技术需自旋极化电子。因此在专门的 PTB 刻度中, 当 BESSY II 工作在约化电子束能量 900 MeV 附近时, 建立极化所需的时间太长 (约 30 h), 该方法不能使用; 采用增加 Tous-

收稿日期: 2003-04-14; 修改日期: 2003-06-17

* 基金项目: 中国科学院九五重点项目资助

作者简介: 顾嘉辉 (1943-), 男 (汉族), 江苏苏州人, 研究员, 从事核谱学和核结构研究。

chek 散射率来探测退极化, 由于信噪比太小, 不能用在非常小电子束流的情况. BCS 方法可在大动态电流范围内工作, 采用低能量激光光束与电子束碰撞, 非常快地精确决定电子束能量, 同时使电子束损失能量后仍落在贮存环动力学孔径内而不会损失, 因此能在线地监测电子束能量, 而不影响同步辐射加速器工作. 同时 BCS 方法是唯一能精确测量电子束横向和纵向极化的方法.

文献[10]中详细地描述了 BCS 过程, 图 1 是 Compton 背散射过程示意图, 根据相对论运动学, 可以得到 BCS 光子能量与出射角 θ 的关系, 当激光光子反平行于电子束入射 ($\theta_1 = 180^\circ$), 并发生 180° 背散射时 ($\theta = 0^\circ$), 散射光子获得的最大能量为

$$E_{\gamma}^{\max} = \frac{4E_e^2 E_L}{m_e^2 c^4 + 4E_e E_L}, \quad (1)$$

式中 E_e 和 E_L 分别为电子和激光光子能量, m_e 和 c 分别表示电子静止质量和光速. Compton 谱在最大能量时显示出明显截断边缘, 散射光子集中在绕电子束前向立体角为 $1/\gamma$ 的窄锥体中, $\gamma = E_e/m_e c^2$.

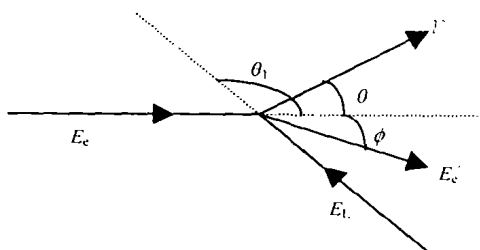


图 1 康普顿背散射过程示意图

Klein-Nishina 公式能描述在电子静止坐标系中对头碰撞的微分截面, 经过 Lorentz 变换后得实验室坐标系中的微分截面^[10]. 然后可以计算得到每个脉冲产生散射光子的产额 Y 为

$$Y = \frac{2N_e N_p \sigma d}{A c \tau}, \quad (2)$$

其中 N_e 和 N_p 分别为每脉冲电子和激光光子数, σ 是总 Compton 散射截面, d 为平均作用长度, A 是电子束和激光束横向大小中较大的一个, τ 是两个束的脉冲长度中较长的一个.

影响散射光子谱的因素主要有电子能量偏差、电子入射角的分布、激光线宽度和探测器的能量分辨率. 假设电子能量分布是高斯形, 中心能量是 E_e , 标准偏差 ΔE_e , 相应散射光子能量的误差为

$$\frac{\Delta E_{\gamma}}{E_{\gamma}} \cong 2 \frac{\Delta E_e}{E_e}. \quad (3)$$

在最大能量处的光子产额依赖于入射电子角分布, 而角分布不引起全谱最大能量的变化. 引起散射光子能量的误差为

$$\frac{\Delta E_{\gamma}}{E_{\gamma}} = -\gamma^2 (\Delta\theta)^2, \quad (4)$$

$\Delta\theta$ 是入射电子束的发散(角分布), 它是一个极小值. 假设激光束为具有标准偏差 ΔE_L 的高斯形, 引起散射光子相对误差为

$$\frac{\Delta E_{\gamma}}{E_{\gamma}} \cong \frac{\Delta E_L}{E_L}. \quad (5)$$

如果采用 CO_2 激光, 其相对线宽约为 0.0005. 探测器分辨率是影响 BCS 谱的主要因素, 它引入能量误差为

$$\frac{\Delta E_{\gamma}}{E_{\gamma}} = \frac{\sigma}{E_{\gamma}}, \quad (6)$$

其中 $\sigma = \text{FWHM}/2.35$, FWHM 为多道分析器测得参考能量峰的半高宽. 假设这些因素是独立的, 总能量误差可以表示为

$$\frac{\Delta E_{\gamma}}{E_{\gamma}} = \sqrt{\left(\frac{\Delta E_L}{E_L}\right)^2 + \left(\frac{2\Delta E_e}{E_e}\right)^2 + \frac{\sigma^2}{E_{\gamma}^2}}. \quad (7)$$

使用误差传递, 从最大背散射光子能量 E_{γ}^{\max} 得到电子束能量测量的误差 ΔE_e 为

$$\frac{\Delta E_e}{E_e} = \frac{1}{2} \sqrt{\left(\frac{\Delta E_{\gamma}^{\max}}{E_{\gamma}^{\max}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta E_L}{E_L}\right)^2}. \quad (8)$$

BCS 光子最大能量的误差由探测器能量刻度和计数统计决定, 当激光束和电子束的交角不是 180° , 而有一偏差 $\Delta\theta_1$, 它在 E_{γ} 上的影响为

$$\frac{\Delta E_{\gamma}^{\max}}{E_{\gamma}^{\max}} = \frac{(\Delta\theta_1)^2}{4}, \quad (9)$$

因此几个 mrad 量级的小角产生的影响可以被忽略. 探测器必须相对于电子束的前向很好地对准, 因为它的影响为 $\Delta E_{\gamma}^{\max}/E_{\gamma}^{\max} = (\Delta\theta)^2$.

图 2 显示在最大 BCS 光子能量处 Compton 散射光子谱, 采用探测器分辨率给出标准偏差和电子能量展宽高斯函数. 卷积给出最大 E_{γ} 处尖锐的边缘. 采用下列方式决定边缘位置处能量: 在边缘位置 $x = a_1$ 处的小区域内 $[x_1, x_2]$ 可用下列归一化函

数近似描述：

$$h(x) = \begin{cases} 1 + a_4(x - a_1), & \text{对 } \leq a_1 \\ 0, & \text{其它} \end{cases} \quad (10)$$

a_4 是在边缘前谱线的斜率. 乘积 $a_4(x - a_1)$ 比 1 小, 当 $a_4 = 0$ 时, $h(x)$ 简化为通常的阶梯函数. 函数 $h(x)$ 用一标准偏差为 a_2 的高斯折叠:

$$g(x) = \frac{\exp(-x^2/2a_2^2)}{\sqrt{2\pi a_2}} \quad (11)$$

对变量位置和边缘高度匹配函数为

$$\begin{aligned} f(x; a_1, \dots, a_5) &= a_3 \{ (1 + a_4(x - a_1)) \cdot \\ &\frac{\text{erfc}[(x - a_1)/\sqrt{2a_2}]}{2} - \\ &a_2 a_4 \frac{\exp[-(x - a_1)^2/2a_2^2]}{\sqrt{2\pi}} \} + a_5, \end{aligned} \quad (12)$$

其中 $\text{erfc}(x) = (2/\sqrt{2\pi}) \int_x^\infty \exp(-t^2) dt$, 参数 $a_1 \dots a_5$ 为 E_{γ}^{\max} 位置、折叠高斯函数的标准偏差、边缘的高度、边缘前的斜率和匹配谱的常数偏置.

文献[2, 4]报导了德国 PTB 应用 BCS 方法对 BESSY II 和 BESSY I 贮存环电子束进行能量的精确测量, 并与采用 RSD 方法的测量进行比较. BESSY I 主要工作在 800 MeV, 两种技术在相对误差 2×10^{-4} 内符合^[2, 11]. 新建立的 BESSY II 工作在 900—1 700 MeV, 结果与 RSD 技术在 3.1×10^{-5} 相对误差内一致^[4].

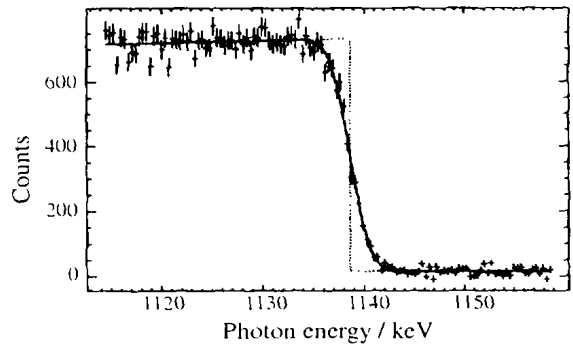


图 2 最大 BCS 光子能量附近能谱的特写图
—为通过谱的匹配, ---为不存在有限探测器分辨率和电子能量展宽时的理论线形.

图 3 为 BESSY II 利用 BCS 方法的 PTB 放射性计量实验室的实验装置框图, 装置中采用 CW

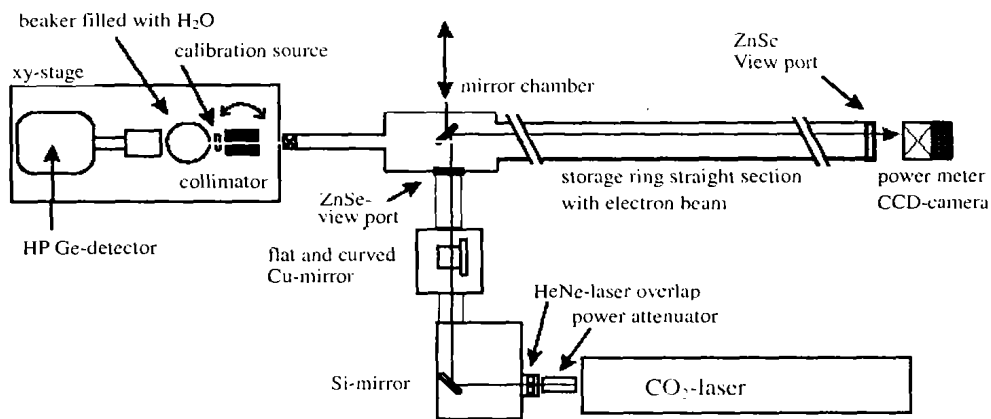


图 3 在 BESSY 的 PTB 辐射计量实验室实验装置框图

光栅调谐 CO₂ 激光器. 实验装置中带铅准直器的 HPGe 探测器与 γ 束的对准非常重要(即保证前向散射 $\theta = 0^\circ$ 的光子到达探测器), 在已对准了准直器的情况下, 电子束的发射度不改变高能 E_{γ}^{\max} 的位置. 它的接收角决定散射谱的低能截断, 因此决定积分计数率, 不影响高能边尖锐边缘处的能量位置. 如果考虑计数率和截断的能量位置, 采用小孔径准直器有利.

图 4 显示 CBS 方法能用于近似 4 个量级电子

束流大动态范围, 对大和低电子束流时, 数据获取时间近似从 300 s 到 2 000 s.

高斯形折叠标准偏差 a_2 (BCS 光子最高能量误差由探测器分辨率 σ_{det} 和电子能量展宽 σ_w (能散)) 的卷积给出:

$$\frac{a_2}{E_{\gamma}^{\max}} = \left(\frac{\sigma_{\text{det}}}{E_{\gamma}^{\max}} \right)^2 + \left(2 \frac{\sigma_w}{W} \right)^2, \quad (13)$$

其中 σ_{det} 从同时测量的标准源(如 ⁶⁰Co)得到, W 为

电子束能量. 根据上述方程由 a_2 可求得能散度.

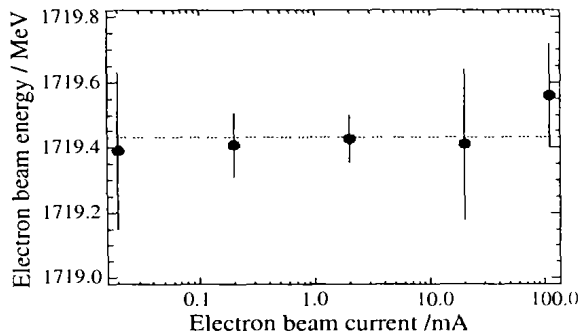


图 4 电子贮存环一次注入后不同流强时的电子束能量

BCS 方法的另一个应用是动量压缩 (compaction) 因子 α 的测量, 它以贮存电子的回转频率的相对频率移 $\Delta f/f$ 与相对能量移 $\Delta W/W$ 表示:

$$\frac{\Delta W}{W} = \left(\frac{1}{\gamma^2} - \alpha \right)^{-1} \frac{\Delta f}{f}. \quad (14)$$

BESSYI 得到不同频率时的相对电子能量 (用 E_{γ}^{max} 决定) 移与相对频率移的关系, 从直线对数据点匹配的斜率, 通过上述方程得到动量压缩因子 $\alpha = 1.61(2) \times 10^{-2}$, 其结果与预期值很好符合.

3 辐射标准实验站

自 1984 年以来, PTB 使用 BESSYI 的 800 MeV 电子储存环作为主要辐射标准, 使用计算弯铁 1 eV 到 15 keV 的光子谱 (能量 E 的通量 Φ_E 具有

$4 \times 10^{-4} - 4 \times 10^{-3}$ 的相对误差), 在可见光到软 X 射线光子谱范围内, 进行辐射源和能量色散探测器的刻度. 1998 年 BESSYII 投入运行, 把能谱扩展到 50 keV 的 X 射线. PTB 建立的 BESSY 已成为从可见光到 X 射线的欧洲主要辐射源的标准, 对 BESSYII 得到弯铁计算的 Φ_E 在能量小于 3 keV 时具有 3×10^{-4} 的相对误差, 到 50 keV 时具有 2×10^{-3} 的相对误差.

PTB 在 BESSYI 电子贮存环上有 4 条光束线 6 个实验站^[3], 它们主要从事辐射计量刻度和光学元件表征. 它计算非色散谱的光子通量相对误差小于 0.4%, 在一条光束线上对从 1 eV 到 15 keV 范围内的能量色散探测器和单色器-探测器系统进行刻度, 在 3 个装有单色器的实验站进行从 3 eV 到 1.8 keV 谱范围内的辐射源刻度. 对探测器刻度和反射率测量, 采用覆盖 3 eV 到 1.5 keV 谱范围的 3 个实验站提供的单色同步辐射 (强调高纯度谱). 表 1 列出 6 个实验站的能区和主要应用, 其中 5 个使用了单色器. 这些束线设计要求不同于典型基础研究的需要, 绝对辐射测量主要要求高的谱纯度 (要求杂散光和单色器较高次幂的贡献小于 1%), 对探测器刻度要求高辐射功率, 而谱的分辨率要求是适度的. 总谱光子通量的相对误差 $\Delta \Phi_E / \Phi_E$ 随光子能量增加而增加, 从 1 eV 的约 0.1% 变化到 15 keV 时的 0.4%, 它来源于 Φ_E 计算中的 7 个参数.

表 1 PTB 辐射实验室中辐射计量刻度和测试站

站号	单色器	光子能量	通常应用
1	1 m, 15° McPherson	3—35 eV	辐源刻度
2	1 m, 15° McPherson	3—35 eV	探测器刻度
3	没有 (无色散 SR)	1 eV—15 keV	能量色散探测器刻度
4	162° 环形光栅	35—250 eV	源刻度, 反射率测量
5	5 m Rowland 圆	250 eV—1.8 keV	源刻度
6	SX700	40 eV—1.5 keV	探测器刻度, 反射率测量

4 结论

总之, 激光光子与贮存环中相对论电子通过康普顿背散射产生的 γ 光子束除了可用来开展核物理实验研究及相关应用研究外, 也能用来监测贮存环中电子束的性能, 如极化度、能量、能散度和动

量压缩等. 在弯铁辐射谱的计算中, Schwinger 方程的关键输入参数是精确的电子能量值. 采用 BCS 技术在线、非破坏性、快速和精确地测量电子束能量, 为在同步辐射装置上建立辐射标准实验站和国家辐射计量实验室, 进行各种辐射源刻度、标准探测器定标和各波段光学元件特性测试提供保证.

参 考 文 献:

- [1] Arnold D, Ulm G. Electron Storage Ring BESSY as a Source of Calculable Spectral Photon Flux in the X-ray Region[J]. Rev Sci Instr, 1992, **63**: 1 539.
- [2] Klein R, Mayer T, Kuske P, *et al.* Beam Diagnostics at the BESSY I Electron Storage Ring with Compton Backscattered Laser Photons: Measurement of the electron energy and related quantities[J]. Nucl Instr and Meth, 1997, **A384**: 293.
- [3] Ulm G, Wende B, Radiometry Laboratory of Physikalisch-technische Bundesanstalt at BESSY[J]. Rev Sci Instr, 1995, **66**: 2 244.
- [4] Klein R, Kuske P, Thornagel R, *et al.* Measurement of the BESSY II Electron Beam Energy by Compton-backscattering of Laser Photons[J]. Nucl Instr and Meth, 2002, **A486**: 545.
- [5] Thornagel R, Klein R, Ulm G. The Electron Storage Ring BESSY II as a Primary Source Standard from the Visible to the X-ray Range[J]. Metrologia, 2001, **38**: 385.
- [6] Madden R P, Ederr D L, Parr A C. Experimental Program at the National Bureau Standards Synchrotron Ultraviolet Radiation Facility(SURF)[J]. Nucl Instr and Meth, 1985, **B10/11**: 289.
- [7] Suzuki Isao H. Comparison between Measured and Calculated Absolute Intensities of Ultra-soft X-rays of Synchrotron Radiation[J]. Nucl Instr and Meth, 1984, **228**: 201.
- [8] Schwinger J. On the Classical Radiation of Accelerated Electrons[J]. Phys Rev, 1949, **75**: 1 912.
- [9] Derbenev Ya S, Kondratenko A M, Sperednyakov S I, *et al.* Accurate Calibration of the Beam Energy in a Storage Ring Based on Measurement of Spin Precession Frequency of Polarized Particles[J]. Part Accel, 1980, **10**: 177.
- [10] 蔡翔舟, 顾嘉辉, 郭 威等. 基于同步辐射加速器的康普顿背散射 γ 射线源(1)产生 MeV 量级 γ 光子的数值计算[J]. 高能物理与核物理, 2002, **26**: 882.
- [11] Klein R, Mayer T, Kuske P, *et al.* Measurement of the Electron Energy and Energy Spread at the Electron Storage Ring BESSY I[J]. J Synchrotron Rad, 1998, **5**: 392.

Diagnosis and Application of Compton Backscattering Technique in Storage Ring for Electron Beam*

I Accurate Measurement of the Electron Beam Energy and Experimental Stations of Radiometric Standard

GU Jia-hui, CAI Xiang-zhou, GUO Wei, SHEN Wen-qing

(Shanghai Institute of Nuclear research, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

Abstract: The technique to measure the electron beam energy accurately with Compton backscattering technique is introduced and requirements for the experimental stations of radiometry are also described in the paper.

Key words: Compton backscattering technique; electron beam energy; experimental stations of radiometric standard

* Foundation item: Major Subject of Chinese Academy of Sciences