文章编号：1007－4627(2004)01－0021－05

康普顿背散射技术对贮存环电子束诊断及其应用*

II 贮存环电子束的极化度测量

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：简单介绍以激光-电子康普顿背散射原理为基础建立的康普顿背散射极化仪，采用它能实时、非破坏性地监测电子束的极化. 该项工作可作为上海激光电子 γ 源(SLEGS)低能 γ 束应用研究的内容之一.

关 键 词：康普顿背散射极化仪；横向和纵向极化度；非对称性
中图分类号：TL67 **文献标识码**：A

1 引言

许多实验室现在采用注入极化和贮存束的辐射极化来获得贮存环极化电子束[1,2]，极化电子已广泛应用于表面物理、生物物理、原子物理与分子物理、核物理与粒子物理的研究中[3]. 康普顿(Compton)背散射极化仪提供了测量电子束极化的一个极快和精确的方法，而且这一方法是非破坏性的，可实时地监测电子束的极化. 当使用圆极化光子与极化电子束散射时，由于自旋依赖 Compton 散射截面的非对称性，用改变光子束的螺旋性能决定电子束的极化. 对横向极化电子束，非对称性由相对电子轨道平面获得，对纵向极化电子从测量能量依赖的截面来得到非对称性. 许多实验室已采用 Compton 背散射极化仪来测量横向极化电子束的极化度[1,4,5]，荷兰 Amsterdam 核物理和高能物理研究所报导了在 NIKHEF 的 AmPS 环上极化电子束的第一次纵向极化测量[6,7]. 总之，快速极化测量是得到极化度并进行轨道校正的重要工具.

2 极化原理

电子是自旋为 1/2 的粒子，它的极化为矢量极化，其大小即极化度定义为

$$P = \frac{N_+ - N_-}{N_+ + N_-}, \tag{1}$$

其中 N_+ 是自旋沿量子化轴投影为 +1/2 的粒子数，N_- 是投影为 −1/2 的粒子数. 矢量极化的方向为极化度取极大值的方向. 对自旋为 1 以上的粒子体系，除矢量极化外，还存在张量极化.

极化方向垂直于粒子束动量方向时称为横向极化，极化方向与粒子束动量方向平行或反平行时称为纵向极化. 横向极化易实现，而纵向极化难度大一些. 完全纵向极化束指所有粒子具有相同的螺旋度；不完全纵向极化束指粒子具有两种不同的螺旋度. 对于环形加速器，前苏联的 L. M. Ternov 等在 1962 首先指出高能电子在均匀磁场中运动的狄喇克方程解给出，由于电子束初态自旋取向不同，表现出微弱的不对称性，这种不对称性会导致环形加速器电子束流的逐渐极化[1,4].

考虑来自导向磁场自然辐射 Sokolov-Ternov 机制和来自真实贮存环中径向场退极化的影响(不对准引起畸变等)，极化建立能用指数函数描写：

$$P_e(E,t) = \frac{\pm P_{max}(1 - e^{-t/\tau})}{1 + \tau_p/\tau_d}, \tag{2}$$

其中 $\pm P_{max}$ 为 Sokolov-Ternov 渐进极化度，$1/\tau = 1/\tau_p + 1/\tau_d$ 为有效建立常数. $\tau_p(E)$ 为固有辐射极化上升时间，τ_d 描述退极化机制的影响，磁矩自旋取向符号(+表示正电子). e^- 束的极化方向和弯转磁场方向反平行，e^+ 的极化方向和磁场平行. 通常极

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"重点基金资助项目
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.

化的建立可表示为

$$P(t) = P_{st}(1 - e^{-t/\tau_{st}}) , \quad (3)$$

τ_{st}为极化建立时间，P_{st}为平衡极化度. 对圆形轨道，建立时间 τ_{st}是电子束能量和磁场偏转半径 ρ 的函数：

$$\tau_{st} = \frac{5\sqrt{3}}{8}\left(\frac{c\,\lambda\!\!\!^{-}_C r_0 \gamma^5}{\rho^3}\right)^{-1} , \quad (4)$$

$\lambda\!\!\!^{-}_C$ 和 r_0分别为电子 Compton 波长和电子经典半径，γ 为相对论因子. 如不考虑退极化效应，最终可达极化度

$$P_{st} = \frac{8}{5\sqrt{3}} = 92.38\ \% . \quad (5)$$

对非圆形轨道需乘上校正因子 R/ρ，任意形状轨道加速器的 τ_p为

$$\tau_p = \frac{5\sqrt{3}}{8}\left(\frac{c\,\lambda\!\!\!^{-}_C r_0 \gamma^5}{s}\oint \frac{ds}{|\rho|^3}\right)^{-1} = 98.7\frac{\rho^2 R}{E_e^5} , \quad (6)$$

式中，s 为轨道周长，积分沿轨道环路进行. 从上式可知，极化建立时间与束流能量的 5 次方成反比，能量越低，建立极化所需的时间越长.

在真实贮存环中，电子束受到磁场作用比 Sokolov-Ternov 机制假设的情况更为复杂，即受到限制电子轨道和不可避免的不重合错位场影响. 贮存环中除存在使电子束极化的效应，还存在使极化的电子去极化的效应，因此往往达不到理论预期的最大极化度. 除了引起自旋翻转非常小的几率外，同步辐射的产生是引起退极化的主要原因，它的发射会引起电子轨道的振荡，而无规则激发的振荡会引起自旋的扩散，导致退极化效应. 因此电子极化过程可由两部分描述，即 Sokolov-Ternov 效应引起极化建立(用量子力学描述)和来自贮存电子的经典随机运动产生自旋扩散引起的退极化. 当自旋运动和轨道振荡耦合时，退极化效应最明显，这称为共振退激化.

极化测量有两种不同方法，单光子方法和多光子技术. 在单光子方法中，电子束与低能高重复频率激光脉冲产生相互作用，每次相互作用产生背散射 γ 计数≈1 Hz 量级，最大计数率由电子束在环中旋转频率决定. 多光子技术由高峰值功率激光束作用产生每次至少 10^4 个光子，在这种情况中最大 γ 计数率受激光重复频率限制，但能更有效地消除本底干扰.

3 Compton 背散射极化仪的原理及测量方法

精确快速地测量极化度与加速器轨道参数调整结合才能获得较高的束流极化度. Compton 背散射是测量极化的简单有效方法，它采用激光束产生的低能光子和极化的高能电子散射，散射后的光子是在实验室坐标系中基本上沿电子束动量方向、分布在 $1/\gamma$($\gamma = v/c$ 相对论因子)很小立体角中的高能 γ 射线，散射后电子能量也发生变化. 建立极化仪的方法分为两类，一类通过测量反冲电子的动量来确定束流的极化度，另一类测量散射 γ 射线. 测量散射 γ 的能谱(反映能量依赖的截面)可确定束流的纵向极化度[6,8]，测量散射 γ 的空间位置分布(非对称性)可确定束流的横向极化度[4,7,8,9].

激光 Compton 背散射极化仪的原理是依据圆极化光子在高能电子/正电子束上发生自旋依赖 Compton 散射，散射 γ 光子的强度 $N = f\,L$[10,11]. 其中 f 为激光光子束与电子束团每秒碰撞的次数，$L = \sigma_C n_e I_\gamma L_e f_s$为每电子束团与激光束散射后的光子数. n_e为每束团电子数，I_γ为激光强度，σ_C为 Compton 散射截面，L_e为有效作用长度；f_s为激光与电子束的空间重迭因子，它等于电子束与激光束相交部分面积占激光束截面的百分比乘以相交部分占电子束流截面的百分比.

$P = (P_x, P_y, P_z)$表示为笛卡儿坐标系中的电子极化，光子极化用 Stokes 矢量表示 $\boldsymbol{S}(\boldsymbol{S}_0, \boldsymbol{S}_1, \boldsymbol{S}_2, \boldsymbol{S}_3)$[1]，其分量定义为

$$\begin{aligned} S_0 &= E_1^2 + E_2^2 , \\ S_1 &= E_1^2 - E_2^2 , \\ S_2 &= 2E_1E_2\cos\delta , \\ S_3 &= 2E_1E_2\sin\delta , \end{aligned} \quad (7)$$

E_1和 E_2是相差为 δ 的电场直角分量. 对 Stokes 矢量归一化，$S_0 = 1$. 线性极化的大小为 $S_{lin} = \sqrt{S_1^2 + S_2^2}$，极化方向由电场 E_{lin}和方位角 ϕ_{lin}决定. 圆极化的大小 $S_{circ} = |S_3|$，S_3的符号表示极化的螺旋性，$S_3 < 0$($\sin\delta < 0$，E 的转动和传播方向形成右手螺旋)为右手螺旋性，$S_3 > 0$ 为左手螺旋. 光的极化度为 $\zeta = \sqrt{S_1^2 + S_2^2 + S_3^2}$，$\zeta = 1$ 表示激光完全极化.

圆极化大小与线极化的关系为 $S_{circ}=\sqrt{1-S_{lin}^2}$.

图 1 给出了电子实验室坐标系中 Compton 散射的运动学表示，从中可以得到初始电子和光子极化为 P 和 S 的 Compton 截面函数，通过改写方程能把初始电子极化的横向和纵向成分、初始光子极化及测到的线和圆极化成分分开[1]，

$$\frac{d\sigma_C}{d\Omega}(S,\ P)$$
$$=\Sigma_0+S_1(0)\ \Sigma'_1+S_3[P_y\Sigma_{2y}+P_z\Sigma_{2z}, \quad (8)$$

其中

$$\Sigma_0=C[(1+\cos^2\theta)+(k_i-k_f)(1-\cos\theta)]\ ,$$
$$\Sigma'_1=C\cos2\phi\sin^2\theta\ ,$$
$$\Sigma_{2y}=-CK_f\sin\phi\sin\theta(1-\cos\theta)\ ,$$
$$\Sigma_{2z}=-C(1-\cos\theta)(k_f+k_i)\cos\theta\ ,$$
$$C=0.5r_0^2k_f^2k_i^{-2}\ ,$$
$$k_i=\frac{2\gamma E_\lambda}{m_e}\ ,$$
$$k_f=\frac{1}{1-\cos\theta+1/k_i}\ ,$$

式中 r_0 为电子经典半径，E_λ 为实验室系光子能量.

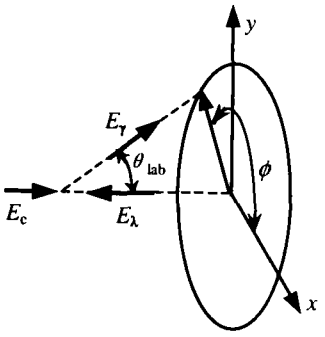

图 1　在实验室系中 Compton 散射的几何和坐标系统(图中没显示末态电子)

对两个任意极化光子 $S_a=(S_{1a},\ S_{3a})$ 和 $S_b=(S_{1b},\ S_{3b})$ 散射截面的非对称性为

$$A(y,\ E_\gamma)=\frac{\sigma_a(y,\ E_\gamma)-\sigma_b(y,\ E_\gamma)}{\sigma_a(y,\ E_\gamma)+\sigma_b(y,\ E_\gamma)}$$
$$=\frac{(S_{1a}-S_{1b})\Sigma'_1+(S_{3a}-S_{3b})(P_y\Sigma_{2y}+P_z\Sigma_{2z})}{2\Sigma_0+(S_{1a}+S_{1b})\Sigma'_1+(S_{3a}+S_{3b})(P_y\Sigma_{2y}+P_z\Sigma_{2z})}$$
$$=\frac{\Delta S_1\ \Sigma'_1+\Delta S_3(\ P_y\Sigma_{2y}+P_z\Sigma_{2z})}{\Sigma_0+\bar{S}_1\ \Sigma'_1+\bar{S}_3(\ P_y\Sigma_{2y}+P_z\ \Sigma_{2z})}\ , \quad (9)$$

其中 $\Delta S_1=(S_{1a}-S_{1b})/2$ 和 $\bar{S}_1=(S_{1a}+S_{1b})/2$，$\Delta S_3$ 和 $\bar{S}_3$ 与上述表示相同.

采用具有 ΔS_1 和 $\Delta S_3\approx1$ 初始光子极化的最佳对 a 和 b，即 $\bar{S}_1=\bar{S}_3=0$，测到已确定电子极化的非对称性极大值. 如当 $\Delta S_3\approx1$，即线性成分小($\bar{S}_1=0$)和圆成分符号相反($\bar{S}_3\approx0$)时，横向电子极化的非对称性达到最大值. 在 $\bar{S}_1=\bar{S}_3=0$ 情况下，非对称性分布能写成下述简单形式：

$$A(y,\ E_\gamma)$$
$$=\Delta S_1\frac{\Sigma'_1}{\Sigma_0}+\Delta S_3\left(P_y\frac{\Sigma_{2y}}{\Sigma_0}+P_z\frac{\Sigma_{2z}}{\Sigma_0}\right). \quad (10)$$

通过背散射光子分布的平均垂直位置移动(沿 y 轴)得到电子横向的极化信息，而由能谱的非对称性可以得到纵向极化信息.

Lipps 和 Toelhoek 计算了自旋依赖的总 Compton 截面 $\sigma_C(S,\ P)$，在文献[5]附录 A 中给出了表达式. 图 2 描述 S 和 $P=100\%$ 时 $\sigma_C(S,\ P)$ 与 θ 的函数关系. 探测器记录背散射高能 γ 射线束的垂直分布，如果电子横向极化，出现依赖于左-右激光光子极化的 γ 计数率上下非对称性和两个垂直移动的分布结果.

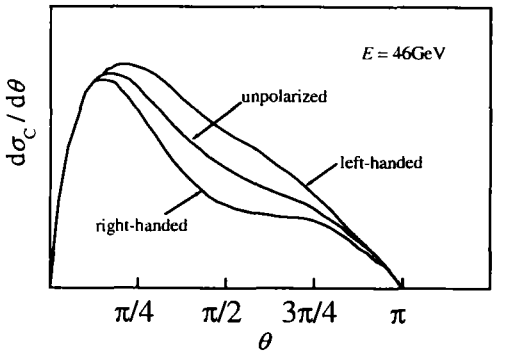

图 2　自旋依赖 Compton 截面对散射角 θ 的分布

由左或右极化光子测得分布的平均垂直位置 $\langle y\rangle$ 中的差别 Δy 可得到电子束横向极化度：

$$\Delta y(E_\gamma)=\frac{\langle y\rangle_Z-\langle y\rangle_R}{2}$$
$$=P_y\frac{S_{3L}-S_{3R}}{2}\Pi(E_\gamma)=P_y\Delta S_3\Pi(E_\gamma)\ , \quad (11)$$

$$P_y=\frac{\Delta y}{\Delta S_3\Pi}\ , \quad (12)$$

其中统计误差 $\delta P_y=\frac{1}{\Delta S_3\Pi}\frac{\sigma_y}{\sqrt{N}}$，$\sigma_y$ 为散射光子分布的均方根宽度，$N=N_L+N_R$ 用于定义平均位置的光子总数，ΔS_3 的误差忽略. S_{3L} 和 S_{3R} 为激光左和

右圆极化度，分析能力 $\Pi(E_\gamma)$ 可从极化依赖 Compton 截面中导出，$\Pi(E_\gamma)=\Delta S_3 P_y=1$ 时的移动. $\Delta S_3 P_y$ 作为自由参数，匹配方程(11)测得移动 $\Delta y(E_\gamma)$，从而得到垂直极化 P_y. 因此在线测量移动 Δy 提供了提取横向电子极化的一个简单和精确的方法.

能谱非对称性的一般形式(服从(10)式)为

$$A(E_\gamma)=\frac{N_L(E_\gamma)-N_R(E_\gamma)}{N_L(E_\gamma)+N_R(E_\gamma)}$$

$$=\Delta S_3 P_z\frac{\int\Sigma_{2z}\mathrm{d}y}{\int\Sigma_0\mathrm{d}y}=\Delta S_3 P_z\frac{\Sigma_{2z}}{\Sigma_0}. \quad (13)$$

图 3 显示能量非对称函数 Σ_{2z}/Σ_0，取 $\Delta S_3 P_z$ 为自由参数，通过方程(13)来匹配测得能量非对称性得到纵向极化 $\Delta S_3 P_z$，在 ΔS_3 已知时(需单独测量)可得纵向分量 P_z. 采用 100%左和右圆极化激光(即 $\Delta S_3=1$)时，立即得到纵向极化度 P_z.

光子圆极化的品质受激光传输系统中光学元件的影响，特别是窗的二次折射，这一影响不能定量地计算，因此装置安装前必须在实验室中研究. 如果要得到电子束的绝对极化度，必须测量激光束的有效极化度 P.

非对称性相对统计精度为[5]

$$\frac{\delta A}{A}=\frac{1}{A\sqrt{2\langle n_{R,L}\rangle}},$$

$\langle n_{R,L}\rangle$ 为要求某精度时对每光子螺旋性的平均计数. 在 $\Delta S_3=1$ 时分析能力为 $\Pi=\delta A/\delta P$，根据极化度 P 和要求统计精度 $\delta A/A$，可得到满足此精度时的测量时间(单位为秒)

$$T_{meas}=\frac{\langle\dot{n}_{R,L}\rangle}{R_\gamma}\approx\frac{1}{2R_\gamma[\Pi P(\delta A/A]^2}, \quad (14)$$

R_γ 为背散射 γ 光子计数率.

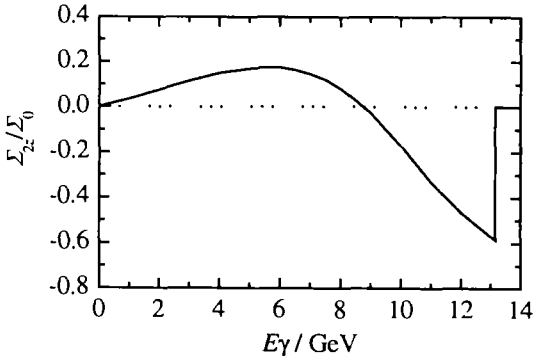

图 3 以光子能量 E_γ 作图的能量非对称函数 Σ_{2z}/Σ_0

图 4 给出典型的德国 DESY 实验室在 HERA 装置上的 Compton 背散射极化仪概图，它由 10 W 连续 Ar 离子激光器和相关激光束光学系统、测量能量和 Compton 背散射光子位置量能器以及数据获取系统组成. 一个 Pockels(PC)来变换圆极化光的左、右极化，转换频率 50 Hz，极化光与电子相互作用后，用光分析器测量圆极化度. 清华大学和中科院高能物理研究所也曾经考虑了在 BEPC 上的 e^+ 和 e^- 束流极化度测量.

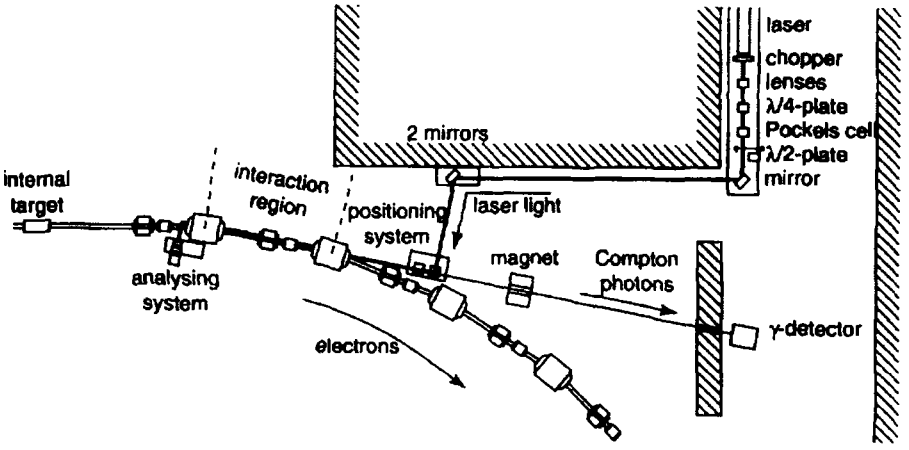

图 4 NIKHEF 极化测量装置概图

4 总结

精确快速地测量极化度是实现束流极化和开展与极化有关物理非常重要的前提，而极化测量本身是一项艰巨和复杂的工作. 因此，如果能把低能光束线的激光与贮存环电子相互作用产生 γ 束及相应实验站[12]建成 Compton 散射极化仪来在线测量 SSRF 电子束流极化度，同时精确对束流能量进行绝对刻度和开展低能核物理实验及相关应用研究，将会大大拓宽低能光束线和实验站的应用领域.

参 考 文 献：

[1] Barber D P, Bremer H D, Böge M, *et al*. The HERA Polarimeter and the First Observation of Electron Spin Polarization at HERA[J]. Nucl Inst and Meth, 1993, **A329**: 79.

[2] Knudsen L, Koutchouk, Placidi M, *et al*. First Observation of Transverse Beam Polarimeter in LEP[J]. Phys Lett, 1991, **B270**: 97.

[3] Celotta R J, Pierce D T. In Advances in Atomic and Molecular Physics[M]. ed Sir David R. Bates, New York: Academic Press, 1980, **16**: 102.

[4] Barber D P, Böge M, Böttcher H, *et al*. High Spin Polarization at the HERA Electron Storage Ring[J]. Nucl Inst and Meth, 1994, **A338**: 166.

[5] Frank Zetsche. Eexperience with the Fast Polarimeter[M]. American Institute of Physics, 1995, 255.

[6] Passchier I, Higinbotham D W, Jager C W, *et al*. A Compton Backscattering Polarimeter for Measuring Longitudinal Electron Polarization[J]. Nucl Inst and Meth, 1998, **A414**: 446.

[7] Passchier I. A Compton Backscattering Polarimeter for Electron Beams Below 1 GeV[A]. In: Jager de C W ed. Proc 12th Int Symp On High-energy Spin Physics [C]. Singapore: World Scientific, 1996, 807.

[8] Swartz M, Band H R, Decker F J, *et al*. Observation of Target Electron Momentum Effects in Single-arm and Moller Polarimetry[J]. Nucl Inst and Meth, 1995, **A363**: 526.

[9] Placidi M, Rossmanith R. e^+e^- Polarimeter at LEP[J]. Nucl Inst and Meth, 1989, **A274**: 79.

[10] Nakajima K, Arinaga M, Kawamoto T, *et al*. Measurement of Equilibrium Beam Polarization in the KEK e^+e^- Storage Ring TRISTAN[J]. Phys Rev Lett, 1991, **66**: 1 697.

[11] 邓景康，尚仁成，朱胜江等. BEPC 束流极化与极化仪的研究[J]. 高能物理与核物理，1997, **21**(6): 562.

[12] 顾嘉辉，蔡翔舟，郭　威等. 康普顿背散射技术对贮存环电子束诊断及其应用 Ⅰ[J]. 原子核物理评论，2003, **20**(4): 259.

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

II Measurements of Polarization of Electron Beam in Storage Ring

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 Compton backscattering polarimeter is described briefly on the basis of the principle of Compton backscattering in this paper. The polarization of the electron beam can be measured and monitored on time and nondestructively. The project will be one of applications of low energy γ-ray beam of SLEGS.

Key words: Compton backscattering polarimeter; tranverse and longitudinal polarization; asymmetry

* **Foundation item**: Major Subject of Chinese Academy of Sciences