

光学极化度测量仪的研制及弱光 Stokes 参数的测量*

李兴鳌^{1,2} 阮存军¹ 高君芳¹ 肖渊¹ 庞文宁¹ 尚仁成¹

(1 清华大学物理系 北京 100084)

(2 湖北民族学院物理系 湖北恩施 445000)

摘要 极化电子束在物理学及其相关领域应用十分广泛,要深入研究这些应用必须对电子束的极化度进行精确测量,通常测量电子束极化度的仪器有两种: Mott 极化度测量仪和光学极化度测量仪.因光学极化度测量仪与 Mott 极化度测量仪相比有许多优点而倍受关注.文章首先阐述了光学极化度测量仪的理论基础和实验原理,然后介绍了所研制的光学极化度测量仪的设计方案和物理结构,最后给出了用该光学极化度测量仪测量弱光的 Stokes 参数的结果

关键词 极化电子,极化度测量仪,Stokes 参数

DEVELOPMENT OF OPTICAL ELECTRON POLARIMETRY AND MEASUREMENT OF WEAK LIGHT STOKES PARAMETERS

LI Xing-Ao^{1,2} RUAN Cun-Jun¹ GAO Jun-Fang¹ XIAO Yuan¹PANG Wen-Ning¹ SHANG Ren-Cheng¹

(1 Department of Physics, Tsinghua University, Beijing 100084)

(2 Department of Physics, Hubei Institute for Nationalities, Hubei Enshi 445000)

Abstract Polarized electron beam has been widely used in the research of physics and related areas. However, to perform such experiment, the polarization of the incident electron beam must be determined accurately. Presently there are two types of instrument to detect the polarization of electron beam, one is Mott polarimetry, and another is optical electron polarimetry. Comparing to the Mott one, the optical electron polarimetry has more advantages. In this paper, we present the fundamental theory and the experimental principle of the optical electron polarimetry. The full structure and character of our optical electron polarimetry are illustrated. Finally, using this apparatus, good experimental results are achieved for the measurement of the relative Stokes parameters of the simulated weak light, which were compared with the theoretical results.

Key words polarized electron, optical electron polarimetry, Stokes parameters

1 引言

近年来极化电子束在物理学及相关领域得到了广泛的应用并取得了瞩目的成绩,为了深入了解极化电子束的这些应用,必须对电子束的极化度进行精确测量.电子束的极化,是指电子束中电子的自旋角动量在某些方向上分布的不对称性,通常用极化度矢量 P_e 来描述这种不对称性.电子束的极化度定义为^[1]

$$P_e = P_e \hat{e}_z = \frac{N^\uparrow - N^\downarrow}{N^\uparrow + N^\downarrow} \hat{e}_z, \quad (1)$$

其中 N^\uparrow , N^\downarrow 分别代表电子束中自旋向上(沿 z 轴正向)和自旋向下(沿 z 轴负向)的电子数目.1969年,Farago 和 Wykes^[2]首次提出用光学的方法测量电子束的极化度,其基本思想如下:一束纵向极化电子束激发气态靶原子,使靶原子跃迁到亚稳态的高能级,在这一激发过程中,电子-电子自旋交换起着

* 国家自然科学基金(批准号:19874037)资助项目
2000-07-06 收到初稿,2000-08-16 修回

主要作用.激发后的电子退激到低能级时辐射出荧光,通过测量荧光在不同偏振方向上的光强,可求出入射电子极化度.他们建议可以通过观察 Hg 的 $6^3P_1 \rightarrow 6^1S_0$ 的退激跃迁来测量电子束的极化度.1971年, Wykes 提出更简单的测量极化度的跃迁能级的方法:处于 $ns^2 1S_0$ 基态的 Hg, Cd, Zn 等重金属被极化电子束激发到 $ns(n+1)s^3S_1$ 后,退激到 $nsnp^3P_j$ 时也可以测量电子束极化度^[3],这种方法不仅可测量电子束的纵向极化,而且可以测量电子束的横向极化.1983年, Wolck 等人用 Hg 蒸汽的 $6^3P_1 \rightarrow 6^1S_0$, 测量了横向极化电子束和纵向极化电子束的极化度^[4].1983年, Gay 建议用 He 气体作为靶原子来代替 Zn, Cd 或 Hg 蒸汽, He 的退激跃迁为 $3^3P \rightarrow 2^3S(388.9\text{nm})$ ^[5].使用 He 气体和使用 Zn, Cd, Hg 等重金属相比有很大的优越性.实验上利用 He 原子的退激跃迁 $3^3P \rightarrow 2^3S(388.9\text{nm})$ 来测量电子束极化度的工作由 Fischer 和 Kessler^[6]于1996年完成.光学极化仪和传统的 Mott 极化仪相比有很大优越性,主要表现在:(1) Mott 极化仪只能测量横向极化的电子束;而光学极化仪不仅能测量横向极化电子束,也能测量纵向极化电子束,而且测量方向可以沿任意方向;(2) Mott 极化仪涉及到比较精细的实验装置,实验中 Sherman 因子 $S(\theta)$ 比较难以确定,且极化仪在测量过程中要不断进行校准;而光学极化仪实现简单,测量不需要校准就可以直接得到结果;(3) Mott 极化仪所需极化电子束能量比较高,一般在 50—150keV 时极化仪探测效率比较高,在其他能量范围内探测效率明显下降.所以需要加速器加速极化电子达到所需的能量.而光学极化仪所需极化电子束的能量很低(一般在靶原子相应激发阈值附近 $\sim eV$ 量级),所以很容易实现.

我们实验室研制了一台基于 He, Ne 靶原子的光学极化度测量仪,配合我们研制的极化电子源和 $(e, 2e)$ 动量谱仪开展极化 $(e, 2e)$ 散射研究工作.我们的极化电子源和光学极化度测量仪也可单独工作,用于其他方面的研究.

2 光学极化度测量仪的理论基础

一束极化电子激发处于气态的原子,使其从低能级跃迁到一亚稳态的高能级.处于高能级的原子退激时产生光子,该退激辐射的光子便携带有极化电子束的极化信息.通过测量辐射光子便可知电子

束的极化度,这就是光学极化度测量仪的物理基础.这一过程的原理如图1所示:一束极化电子沿 z 轴方向运动,电子束可以是纵向极化(极化方向与运动方向相同或相反),也可以是横向极化(极化方向垂直于运动方向).但不管是纵向极化还是横向极化,它们唯一不同的就是探测辐射光子的方向不同,即必须在电子束极化方向探测辐射光,所以在此只讨论电子束横向极化的情况.

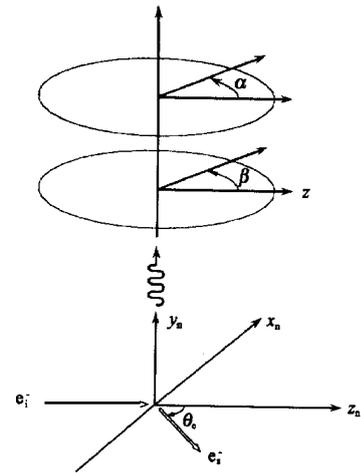


图1 光学极化仪确定 Stokes 参数原理图

设电子束的极化方向为 y 轴方向,定义激发平面为 xz 平面,探测辐射光的方向为 y 轴方向.在探测辐射光强度之前,先让光通过电光晶体进行相位延迟,再经过偏振片,当满足一定条件时即可获得线偏振光和圆偏振光.设电光晶体的快轴方向与 z 轴的夹角为 β ,偏振片的方向与 z 轴夹角为 α ,电光晶体的相位延迟为 δ ,则强度为 I 的辐射光通过电光晶体和偏振片后,光强变为

$$I(\alpha, \beta, \delta) = \frac{1}{2} | I + M \cos 2(\alpha - \beta) \cos 2\beta - \sin 2(\alpha - \beta) \sin 2\beta \cos \delta + C \cos 2(\alpha - \beta) \sin 2\beta + \sin 2(\alpha - \beta) \cos 2\beta \cos \delta + S | \sin 2(\alpha - \beta) \sin \delta |, \quad (2)$$

则 Stokes 参数定义为: $P_1 = \frac{M}{I}$, $P_2 = \frac{C}{I}$, $P_3 = W \frac{S}{I}$.当相位延迟片为正轴晶体时, $W = 1$;当相位延迟片为负轴晶体时, $W = -1$.

Stokes 参数描述了原子被激发到亚稳态能级时的激发态电子云分布信息. P_1, P_2, P_3 都是在垂直于激发平面的方向上探测的,它决定了电子云的分布

布方向以及电子云长和宽的比例.在我们设计的实验中,对 Stokes 参数进行辐射角度的积分测量,它提供了极化电子束激发原子过程中的相互作用.在激发过程中, P_1 与电子束是否极化无关;而 P_2 和 P_3 与电子束的极化有着很密切的关系.非零的 P_3 表明,在激发过程中有着很强的电子-电子自旋交换作用;非零的 P_2 表明,在激发过程中有着自旋-轨道相互作用或者负离子共振激发相互作用.所以,在激发过程中:(1)若入射电子束为非极化的,则 $P_1 \neq 0, P_2 = 0, P_3 = 0$; (2)若入射电子束是极化的,则 $P_3 = 0$,表明电子-电子自旋交换作用在激发过程中可以忽略, $P_3 \neq 0$ 表明电子-电子自旋交换作用在激发过程中起着重要作用; $P_2 = 0$ 表明自旋-轨道相互作用可以忽略, $P_2 \neq 0$ 表明自旋-轨道相互作用不能忽略,或者负离子共振激发起着很重要的作用.

3 光学极化度测量仪的物理设计

要用光学方法测量电子束极化度,必须要求在激发过程中自旋交换作用起着很重要作用,而且入射极化电子束能量在靶原子激发阈值附近,此时 $P_3 \neq 0$,正是 P_3 携带了与电子束极化度 P_e 有关的物理信息.理论研究表明,在靶原子激发阈值附近, P_3 和 P_e 有着很直接的关系,不同的激发原子,该关系有所不同.所以,通过测量 Stokes 参数中的 P_3 分量和 P_1 分量,便可很容易获得入射电子束的极化度.由前面的分析可知,测量 Stokes 参数不仅可获得极化电子束的极化度,还可得知激发过程中的电子-电子自旋交换作用、自旋-轨道相互作用以及负离子共振等信息,从而可以开展极化电子束激发原子的相互作用过程的研究.但要想直接由(2)式计算 Stokes 参数是不容易的,因此我们采用线性拟合法测量 P_1, P_2, P_3 .令:

$$\begin{cases} X_1 = \cos 2(\alpha - \beta) \cos 2\beta \\ \quad - \sin 2(\alpha - \beta) \sin 2\beta \cos \delta, \\ X_2 = \cos 2(\alpha - \beta) \sin 2\beta \\ \quad + \sin 2(\alpha - \beta) \cos 2\beta \cos \delta, \\ X_3 = \sin 2(\alpha - \beta) \sin \delta, \\ Y = I(\alpha, \beta, \delta), \end{cases} \quad (3)$$

和

$$A_0 = \frac{1}{2} I, \quad A_1 = \frac{1}{2} M,$$

$$A_2 = \frac{1}{2} C, \quad A_3 = \frac{1}{2} S, \quad (4)$$

则(2)式变为

$$Y = A_0 + A_1 X_1 + A_2 X_2 + A_3 X_3, \quad (5)$$

系数 A_0, A_1, A_2, A_3 由(5)式用实验数据拟合得到,系数 M, C, S 和光强 I 由(4)式解出,Stokes 参数 P_1, P_2, P_3 也就很容易由其定义得到了.我们这样测量 Stokes 参数的方法比最初的测量方法要准确、方便、造价低,且便于自动控制.最初测量 Stokes 参数是由 Gay 等^[7]在 1991 年作出的,他们用的计算公式如下:

$$\begin{cases} P_1 = \frac{I(0^\circ) - I(90^\circ)}{I(0^\circ) + I(90^\circ)}, \\ P_2 = \frac{I(45^\circ) - I(135^\circ)}{I(45^\circ) + I(135^\circ)}, \\ P_3 = \frac{I(\sigma) - I(\sigma^*)}{I(\sigma) + I(\sigma^*)}, \end{cases} \quad (6)$$

其中 $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$ 为探测辐射光的线偏振方向与 z 轴的夹角,若此夹角用 θ 表示,则 $I(\theta)$ 为在该方向上探测到的线偏振光的强度, $I(\sigma^*)$ 和 $I(\sigma)$ 为探测到的左旋和右旋圆偏振光的强度.在他们的测量系统中,用电压来改变液晶相位延迟片(LCVR)的角度和相位.LCVR 价格昂贵且国内无法购买,所以在我们的测量方案中不用 LCVR,而采用线性拟合的方法实现准确的测量,只不过在测量时间上要长些而已.

我们研制了一套极化(e, 2e)装置,光学极化度测量仪(其原理框图如图 2 所示)是其中很重要的一部分,其目的是测量从极化电子源出来的极化电子

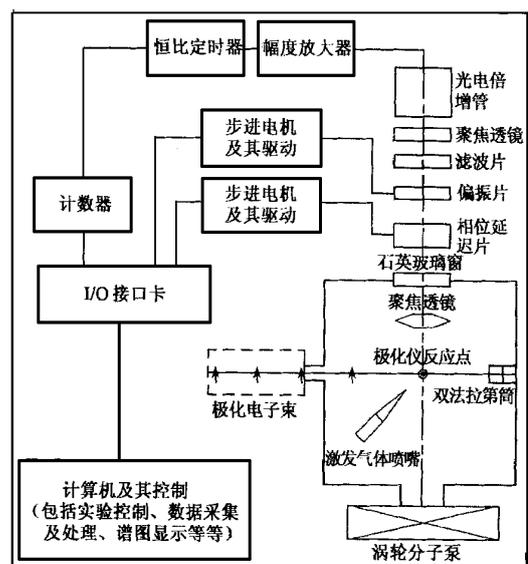


图 2 光学极化度测量仪原理框图

束的极化度.极化电子源产生的极化电子束,经过差分腔和电子光学系统后形成入射能量为 He 激发态 3^3P 的激发阈值(23.01eV)附近的极化电子束,并聚焦到电子和 He 原子的激发点.He 气是通过超声气体喷嘴到激发点,电子束斑直径为 1 mm,气体束斑也为 1 mm 左右.激发后的电子通过后面的双法拉第筒进行收集,监测极化电子束束流的大小.由于电子束极化在垂直方向,因此设计探测荧光方向在反应室上部.退激产生的荧光先经过聚焦透镜后变成平行光束,再经过真空室石英玻璃窗以及相位延迟为 δ 、快轴方向与 z 轴夹角为 β 的电光晶体,然后通过偏振片和滤光片进入光电倍增管(PMT),由 PMT 把光信号转变为电脉冲信号.脉冲信号经过幅度放大器(Amplifier)放大后,进入恒比定时器(CFD)进行信号处理,最后由计数器进行脉冲计数.在一定时间内的计数送入计算机,计算机收集数据,并计算 Stokes 参数以及对应的电子束极化度,最后给出 Stokes 参数与入射电子能量的谱图.由于测量时间很长,所以有必要用计算机进行控制,从而实现实验的自动化.实验中主要有以下几项控制:(1)用计算机控制入射极化电子束的能量 E_p ;(2)用计算机控制步进电机(Motor step)带动电光晶体和偏振片转动到需要的 α 、 β 角;(3)用计算机进行数据拟合和 Stokes 参数计算.我们对光学极化仪反应真空室和荧光接收光学系统的结构也进行了全面的设计.

4 弱光 Stokes 参数的测量

我们研制的整套极化(e,2e)装置已全部安装完毕,目前正在调试之中.为了检验光学极化度测量仪各部分的工作情况,我们用它对弱光的 Stokes 参数进行了测量.测量时首先用步进电机校准偏振片的零点,其次再校准相位延迟片快轴的零点和测量相位延迟角,最后进行 Stokes 参数的测量.测量时, α 、 β 分别由步进电机控制取一系列的分立值,并由数据采集系统测量出对应点的光强值,再由计算系统

进行拟合,计算出 Stokes 参数.为了检验设备的稳定性,我们进行了多次测量,当 α 分别取 0° 或 90° 时, β 则从 0° 每隔 7.5° 变到 360° ,这样即完成了一次测量.我们共进行了 10 次测量,结果如表 1 所示(奇数次为 $\alpha = 0^\circ$ 时的测量值,偶数次为 $\alpha = 90^\circ$ 的测量值). $\alpha = 0^\circ$ 时的平均值为: $\overline{P_1} = 0.915 \pm 0.006$, $\overline{P_2} = -0.001 \pm 0.004$, $\overline{P_3} = -0.013 \pm 0.001$; $\alpha = 90^\circ$ 时的平均值为: $\overline{P_1} = 0.923 \pm 0.001$, $\overline{P_2} = 0.004 \pm 0.002$, $\overline{P_3} = -0.008 \pm 0.002$.从结果可以看出, $P_1 \neq 0$, $P_2 \approx 0$, $P_3 \approx 0$,这与我们前面的理论分析是一致的.从多次测量的结果还可以看出各组数据相差不大,说明我们所研制的光学极化度测量仪各部分已能正常工作,且较为稳定,只要极化电子源能产生极化电子束就可以开展与极化有关的物理研究了.

表 1 测量 Stokes 参数的结果

次数	P_1	P_2	P_3
1	0.916	-0.001	-0.011
2	0.924	0.003	-0.011
3	0.917	-0.008	-0.012
4	0.921	0.006	-0.012
5	0.921	0.001	-0.012
6	0.924	0.001	-0.002
7	0.921	0.002	-0.010
8	0.904	0.006	-0.015
9	0.923	0.006	-0.009
10	0.918	-0.003	-0.014

参 考 文 献

- [1] Joachim Kessler. Polarized Electron. Spring-Verlag, 1985. 16
- [2] Farago P S, Wykes J S. J. Phys. B, 1969, 2: 747
- [3] Wykes J W. J. Phys. B, 1971, 4: 191
- [4] Wolcke A, Bartschat K, Blum K *et al.* J. Phys. B, 1983, 16: 639
- [5] Gay T J. J. Phys. B, 1983, 19: 843
- [6] Fischer I, Kessler J. Rev. Sci. Instrum., 1995, 66: 4885
- [7] Gay T J, Furt J E, Geesmann H *et al.* Inst. Phys. Conf. Ser., 1991, 122: 265

(上接第 746 页)

- [13] 金尚年. 经典力学. 上海: 复旦大学出版社, 1987 [JIN Shang Nian. Classical Mechanics. Shanghai: Fudan Univ. Press, 1987 (in Chinese)]
- [14] Dirac P A M. Lectures on Quantum Mechanics. New York: Yeshira Univ. Press, 1964

- [15] 沈惠川. 物理学报, 2000, 49(2): 201 [SHEN Hui-Chuan. Acta Physica Sinica, 2000, 49(2): 201 (in Chinese)]
- [16] 沈惠川. 现代物理知识, 1993, 5(2): 47 [SHEN Hui-Chuan. Mod. Physics, 1993, 5(2): 47 (in Chinese)]
- [17] Wu T& You. On impulsive motion, braking and Robotry. preprint, 1999