

# 液晶相位可变延迟器在极化电子碰撞实验中的应用\*

任少辣 董占民 庞文宁<sup>†</sup>

(清华大学物理系极化物理实验室 北京 100084)

**摘要** 液晶相位可变延迟器(liquid crystal variable retarders, LCVR)的快慢轴之间的相位差随两端所加的电压连续可调,通过调节电压可以实现对入射光偏振度、偏振方向的操控.文中第2-3部分介绍了LCVR在特定波长不同延迟相位的标定方法及标定结果.第4-5部分介绍了利用LCVR测量Stokes参数的原理及方法.

**关键词** 液晶相位可变延迟器(LCVR) 相位延迟 Stokes参数 极化

## Application of liquid crystal variable retarders in spin-polarized electron collision experiments

REN Shao-La DONG Zhan-Min PANG Wen-Ning<sup>†</sup>

(Polarized Physics Laboratory, Department of Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract** The phase difference between the fast and slow axes of a liquid crystal variable retarders (LCVR) can be changed continuously by modulating an AC voltage applied on the bi-surface of the LCVR. The polarization of an input light beam can thus be controlled by varying the voltage. The calibration method and results of determining the different phase retardances for given wavelengths are described. The theory and method for measuring the integral Stokes parameters by LCVR are also discussed.

**Keywords** liquid crystal variable retarders (LCVR), phase retardance, Stokes parameters, polarize

### 1 引言

极化电子原子散射实验是20世纪70年代在传统电子动量谱学实验的基础上发展起来的一种实验方法,主要通过分析靶原子退激发光的Stokes参数研究原子的精细结构,整个实验包括极化电子的产生、传输及与靶原子的散射,在极化电子束的产生和靶原子退激发光Stokes参数的测量中,需要应用LCVR或1/4波片,但是应用LCVR可减少波片的更换与机械转动次数,可以方便实验操作和简化实验结构的设计.

### 2 液晶相位可变延迟器

液晶相位可变延迟器(liquid crystal variable retarders, LCVR)是一种实时、连续可调的、由双折射液晶材料制成的波片,其结构与实物图见图1和图2.波片中的长条型液晶分子的长轴在自然状态下互相平行,将这个方向定义为LCVR的非常轴(慢轴S轴),与之垂直的轴定义为寻常轴(快轴F轴),快轴和慢轴均平行于波片表面.在波片两面加上交流电压,液晶分子便向着电场的方向转动,这样双折

\* 国家自然科学基金(批准号:30134010,10574079)资助项目  
2008-01-15收到初稿,2008-04-14收到修改稿

<sup>†</sup> 通讯联系人. Email: pangwn@tsinghua.edu.cn

射材料的折射度将改变,从而使通过 LCVR 的光线平行于慢轴的电矢量延迟不同的相位,这个相位的延迟值随电压幅值呈平滑关系,所以在一定范围内可以输出任意的相位延迟。

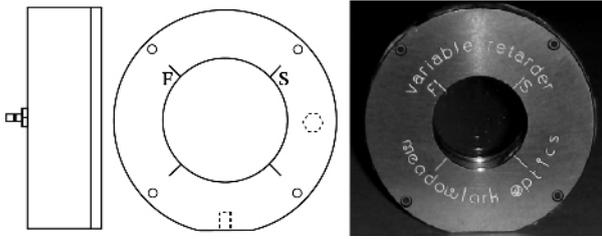


图1 LCVR 结构与实物图(F、S 分别表示快轴和慢轴)

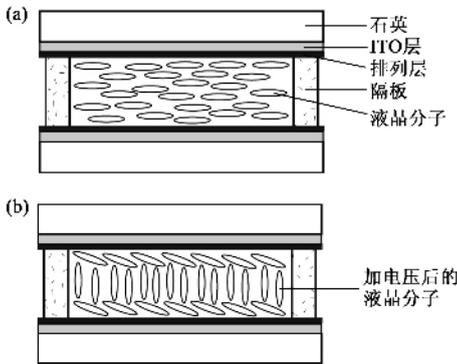


图2 LCVR 结构剖面图 (a)最大延迟( $V=0$ ) (b)最小延迟( $V>0$ )

我们使用的这种波片是将向列型液晶放置在特殊衬底上制成的,向列型液晶是各向异性的分子,它们可以形成单轴双折射层。LCVR 在工作中,其 F 轴是不被调制的,只有 S 轴被调制。

### 3 标定 LCVR 电压

对于特定的波长,LCVR 有 4 个电压分别对应  $\lambda/4$ ,  $\lambda/2$ ,  $3\lambda/4$  和  $\lambda$  的延迟,标定 LCVR,就是找到这 4 个特殊电压值。

如图 3 所示,使激光水平出射,并垂直于偏振片,偏振片的偏振方向为竖直方向。LCVR 放在水平的平台,保证 F 轴 S 轴与偏振片偏振方向成 45 度。出射光垂直入射到旋转检偏器。用计算机控制 LCVR 工作电压,使电压在 20V 至 0V 范围内调节,使延迟由最小开始增大。旋转检偏器输出信号的波形随着 LCVR 出射光的偏振态的改变而改变。输出波形的峰-峰值第一次出现极小值时对应 LCVR 延迟为  $\lambda/4$ (左旋圆偏振),第一次出现极大值时对应 LCVR 延迟为  $\lambda/2$ (水平线偏振),第二次出现极小

值时对应 LCVR 延迟为  $3\lambda/4$ (右旋圆偏振),第二次出现极大值时对应 LCVR 延迟为  $\lambda$ (竖直线偏振),依次类推。

LCVR 对温度的依赖比较明显,延迟随着温度上升而下降(大约为  $-0.4\%/^{\circ}\text{C}$ ),因此标定应在同一温度下进行,本文的标定温度为  $25^{\circ}\text{C}$ 。

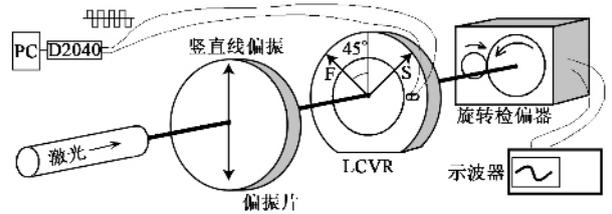


图3 LCVR 标定示意图

表 1 和表 2 是分别对 780nm 激光和从单色仪出射的 495.7nm 的谱线的标定结果。

表 1 780nm 激光器标定 LCVR 结果

延迟波长	延迟/nm	电压/mV	出射光
$\lambda/4$	195	3105	左旋圆偏振
$\lambda/2$	390	2245	水平线偏振
$3\lambda/4$	585	1840	右旋圆偏振
$1\lambda$	780	1565	竖直线偏振
$5\lambda/4$	975	1315	左旋圆偏振

表 2 Ne 原子激发光谱 495.7nm 入射光 LCVR 电压标定

延迟波长	延迟/nm	电压/mV	出射光
$\lambda/4$	123.9	4030	左旋圆偏振
$\lambda/2$	247.9	2950	水平线偏振
$3\lambda/4$	371.8	2420	右旋圆偏振
$1\lambda$	495.7	2150	竖直线偏振
$5\lambda/4$	619.6	1910	左旋圆偏振

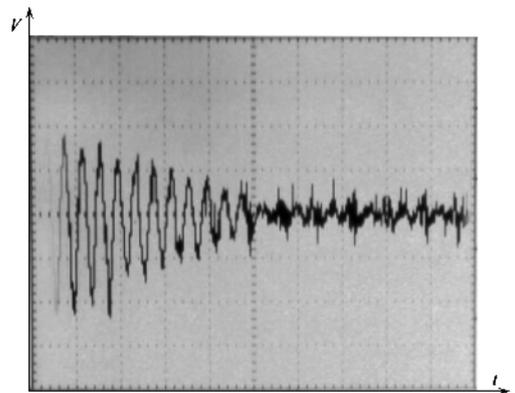


图4 峰峰极小值附近的变化

图 4 是在标定 780nm 激光器的光时,LCVR 电压在接近  $\lambda/4$  电压的区域变化时,旋转检偏器输出信号在示波器上的变化。

### 4 使用 LCVR 产生可控自旋方向的极化电子束

极化电子束可以用正负圆偏振光激发 GaAs 晶片来产生<sup>[1]</sup>，图5是极化电子产生示意图，用正圆偏振光可以激发自旋向上的电子，用负圆偏振光可以激发自旋向下的电子。

用1/4波片产生的正负圆偏振光时，需要通过1/4波片的机械的转动交换快慢轴的取向来实现，其精度依赖于机械转动结构的设计，利用LCVR则只需调节电压使其延迟λ/4或3λ/4来控制圆偏振光的螺旋性，从而控制电子束的自旋方向，并且LCVR响应时间在毫秒量级，这使得瞬时反转自旋方向成为可能。

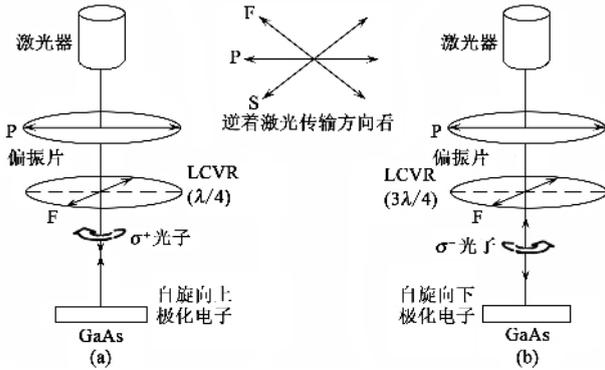


图5 入射光圆偏振态与激发电子束的自旋方向(偏振片p的箭头方向为偏振片的偏振方向,F和S的箭头方向分别表示LCVR的快轴及慢轴的方向)

### 5 用 LCVR 代替 1/4 波片来测量 Stokes 参量

Stokes 参数可以完备地描述偏振光的特性<sup>[9]</sup>，相对 Stokes 参数  $P_1 = (I(0) - I(90)) / (I(0) + I(90))$ ， $P_2 = (I(45) - I(135)) / (I(45) + I(135))$ ， $P_3 = (I(\sigma^-) - I(\sigma^+)) / (I(\sigma^-) + I(\sigma^+))$ ，其中 I 为光强度，括号内的数字表示偏振方向与电子入射方向的夹角， $\sigma^+$ 、 $\sigma^-$  分别表示正负圆偏振光。在这类实验中， $P_1$  与电子的初始极化度无关， $P_2$  与电子的自旋轨道相互作用有关， $P_3$  除了与电子的自旋轨道相互作用有关外，还与散射过程中的电子交换作用有关。

具体测量方法见图6，其中α为偏振片偏振方向与z轴(电子运动方向)的夹角，β为1/4波片(或LCVR)的快轴与z轴的夹角， $\delta = \Delta n \cdot d / \lambda$  是延迟

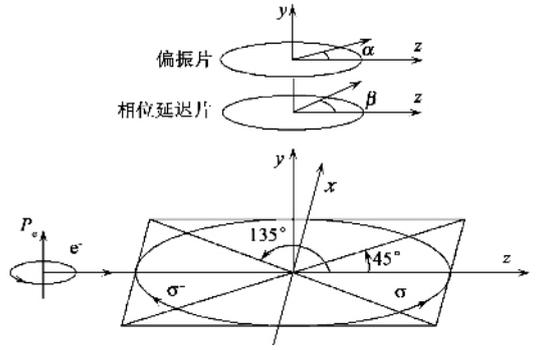


图6 碰撞激发及 Stokes 参量测量的几何结构

片的延迟(对于1/4波片， $\delta = 90^\circ$ ；对于LCVR， $\delta$ 可调)。光子通过相位延迟片和线偏振片后的光强为<sup>[10]</sup>

$$I(\alpha, \beta, \delta) = \{ P_1 [ \cos 2(\alpha - \beta) \cos 2\beta - \sin 2(\alpha - \beta) \sin 2\beta \cos \delta ] + P_2 [ \cos 2(\alpha - \beta) \sin 2\beta + \sin 2(\alpha - \beta) \cos 2\beta \cos \delta ] + P_3 [ \sin 2(\alpha - \beta) \sin \delta ] \} I / 2, \quad (1)$$

其中  $P_1, P_2, P_3$  为相对 Stokes 参量。

在(1)式中，令  $\alpha = 0^\circ, \beta = 135^\circ$  则

$$I(\delta) = (1 + P_1 \cos \delta + P_3 \sin \delta) I / 2. \quad (2)$$

当  $\delta = \pi/2, -\pi/2$  和当  $\delta = 0, \pi$  时，分别有：

$$P_3 = \frac{I(\delta = \pi/2) - I(\delta = -\pi/2)}{I(\delta = \pi/2) + I(\delta = -\pi/2)}; \quad (3)$$

$$P_1 = \frac{I(\delta = 0) - I(\delta = \pi)}{I(\delta = 0) + I(\delta = \pi)}; \quad (4)$$

令(1)式中的  $\alpha = 135^\circ, \beta = 90^\circ$ ，同样延迟  $\delta = 0$  和  $\pi$ ，则有

$$P_2 = \frac{I(\delta = \pi) - I(\delta = 0)}{I(\delta = \pi) + I(\delta = 0)}; \quad (5)$$

实验上，首先使偏振片与z轴的夹角  $\alpha = 0^\circ$ ，且LCVR的快轴与z轴夹角  $\beta = 135^\circ$ ，改变LCVR的控制电压，使LCVR依次工作在原子受激辐射光的波长的  $\lambda/4, 3\lambda/4$  (即  $-\lambda/4$ )， $1\lambda$  (即  $\delta = 0^\circ$ )， $\lambda/2$  处，便可根据(3)式和(4)式得到  $P_3, P_1$ 。旋转偏振片到  $\alpha = 135^\circ$ ，旋转LCVR到  $\beta = 90^\circ$ ，使LCVR工作在  $1\lambda$  (即  $\delta = 0^\circ$ )， $\lambda/2$  处，便可根据(5)式得到  $P_2$ 。

用LCVR代替1/4波片来测量Stokes参量，可以大大降低旋转各种波片的次数，并且在测量多组波长参数时无须更换不同波长的1/4波片，这样就使Stokes参量的测量可以适当地变得简单、快速、准确。

## 6 结束语

用 LCVR 代替  $1/4$  波片,主要应用在极化电子碰撞实验中极化电子束的产生和极化电子原子碰撞后退激发光的 Stokes 参数测量这两部分. 使用 LCVR 减少了波片的机械旋转,且 LCVR 有较快的响应时间,这都有助于提高实验的精度. 在涉及到需要多组适应不同波长的  $1/4$  波片,或需要多次改变圆偏振光螺旋性以及其它有关光相位的延迟实验时,LCVR 都可以作为一种可选择的器件. 在接下来的实验中,极化电子束的激发仍用  $780\text{nm}$  的激光,并就  $\text{Ne}495.7\text{nm}$  和  $\text{Ne}453.8\text{nm}$  的谱线,测量极化电子原子碰撞中的自旋相关效应,已对  $780\text{nm}$  和  $495.7\text{nm}$  的谱线用 LCVR 做了标定,还需要进一步确定 LCVR 在  $453.8\text{nm}$  处  $\lambda/4$ 、 $\lambda/2$ 、 $3\lambda/4$  和  $\lambda$  延迟所对应的电压值.

[ 1 ] 丁海兵. 极化电子碰撞谱仪的研制及氦原子积分 Stokes 参量实验研究(清华大学:物理系博士论文),2005 [ Ding H B. Design and Construction of Spin - polarized Electron Collision Apparatus and Study on Helium Integrated Stokes Parameters( a doctoral thesis ). Tsinghua University : Department of Physics , 2005( in Chinese ) ]

[ 2 ] Liquid Crystal products ' handbook , www. Meadowlark. com

[ 3 ] Juan M Bueno. Polarimetry using liquid - crystal variable retarders : theory and calibration. J. Opt. A : Pure Appl. Opt. , 2000 ( 2 ) 216.

[ 4 ] 丁海兵,庞文宁,刘义保等. 物理学报,2005 , 54 :4097 [ Ding H B , Pang W N , Liu Y B *et al.* Acta Physica Sinica , 2005 , 54 :4097( in Chinese ) ]

[ 5 ] Furst J E , Yu D H , Hayes P A *et al.* Rev. Sci. Instrum. , 1996 , 67 3813

[ 6 ] Pierce D T , Celotta P J , Wang G C *et al.* Rev. Sci. Instrum , 1980 , 51 478

[ 7 ] Ding H B , Pang W N , Liu Y B. Chin. Phys. Lett. , 2005 , 22 : 2546

[ 8 ] Ding H B , Pang W N , Liu Y B *et al.* Chinese Physics , 2005 , 14 2440

[ 9 ] Karl Blum. Density Matrix Theory and Applications. New York and London : Plenum Press , 1981 , 30—35

[ 10 ] Wedding A B , Mikosza A G , Williams J F *et al.* J. Opt. Soc. Am. A , 1991 , 8 :1729



## · 书评和书讯 ·

### 科学出版社物理类重点书推荐

书名	作(译)者	书名	作(译)者
超快和纳米光学	张新平	路径积分与量子物理导引	侯伯元 等
半导体自旋电子学	夏建白 等	技术磁学	钟文定
全息干涉计量 - 原理和方法	熊秉衡	量子信息物理原理	张永德
狭义相对论(第二版)	刘辽 等	量子力学	张永德
经典黑洞与量子黑洞	王永久	晶体振荡器	赵声衡
量子非阿贝尔规范场论	曹昌祺	凝聚态物理的格林函数理论	王怀玉
普朗特流体力学基础(翻译)	H. 欧特尔 等	惯性聚变物理	沈百飞
冲击相变	唐志平	激光的衍射及热作用计算(修订版)	李俊昌
液晶物理学(影印)	P. G. de Gennes	微纳米 MOS 器件失效机理与可靠性理论	郝跃、刘红侠
临界现象理论(影印)	J. J. Binney	量子统计力学(第二版)	张先蔚
软凝聚态物质(影印)	Richard A. L. Jones	输运理论(第二版)	黄祖洽
量子力学原理(第四版)(影印)	P. A. M. Dirac	聚变能及其应用	邱勋俭
基本粒子物理学的规范理论(影印)	T. P. Cheng	拉曼 布里渊散射(第二版)	程光煦
介观物理导论(第二版)(影印)	Y. Imry	现代物理学前沿选讲	黄祖洽
纳米薄膜分析基础(影印)	T. L. Alford	半导体的检测与分析(第二版)	许振嘉
统计力学(第二版)(影印)	F. Schwabl	薄膜结构 X 射线表征	麦振洪等
磁性量子理论 - 材料的磁性性能(第三版)(影印)	R. M. White	d 波超导体	向涛
半导体物理电子学(第二版)(影印)	Sheng S. Li	薄膜材料 - 应力、缺陷的形成和表面演化	卢磊
碳纳米管 - 从基础到应用(影印)	A. Loiseau	激光光散射谱学	张明生
晶体物理学基础(第二版)	陈纲 等	热力学与统计物理	欧阳容百
引力与时空(翻译)	向守平、冯珑珑	量子力学(卷 I, 卷 II)(第四版)	曾谨言
亚稳金属材料	胡壮麒	拉曼光谱学与低维纳米半导体	张树霖
高等原子分子物理学(第二版)	徐克尊	行星科学	胡中为、徐伟彪

购书与咨询电子信箱 : mlhukai@ yahoo. com. cn      dpyan@ sina. com