

液晶相位可变延迟器对自旋极化 电子束极化方向的调制*

丁海兵[†] 庞文宁 刘义保 尚仁成

(清华大学物理系 极化物理实验室 北京 100084)

(2004 年 11 月 5 日收到 2004 年 12 月 2 日收到修改稿)

讨论了液晶相位可变延迟器(liquid crystal variable retarder, LCVR)在自旋极化电子产生方面的应用. LCVR 控制入射光子的偏振度, 从而实现对自旋极化电子束极化方向的调制. 采用 LCVR 代替 1/4 波片和 Pockels 盒的优点在于其对入射光方向不敏感, 传输直径大, 不需要机械转动即可大波长范围的延迟, 且易于校准. 另外, 还研制了旋转检偏器, 通过示波器读出, 对光子偏振性进行检测并对 LCVR 进行校准.

关键词: 自旋极化电子源, 液晶相位可变延迟器, 极化方向

PACC: 2925B, 4210N, 4225J

1. 引 言

液晶是介于完全规则状态与不规则状态之间的中间态物质, 其在力学特性、电特性、磁特性以及光学特性上都存在各向异性. 目前, 液晶技术已广泛应用到液晶显示器、光学数据处理系统、液晶快门、无损探测、温度场成像等领域^[1-3]. 向列相液晶可被指向形成双折射层, 因此在精心准备好的衬底之间排列向列相液晶可制备大孔径相位可调的延迟器, 即液晶相位可变延迟器(LCVR). 不加电压时其延迟相位 $\delta = \Delta n d / \lambda$, 其中 Δn 是液晶的双折射率, d 是液晶层的厚度. 向列相液晶具有电偶极矩, 施加电场趋向于使正的介电各向异性的向列相液晶的分子平行于电场方向排列. 通过改变 LCVR 液晶两端的电压可连续调节光学轴的指向, 从而实现入射光延迟相位的连续可调. 延迟相位的最大值在 0V 获得, 随着电压的增加而减小. LCVR 的原理、特性、校准以及使用等在文献 [4—6] 中已给出.

本文主要描述 LCVR 在产生自旋极化电子方面的应用, 通过计算机控制 LCVR 两端电压, 改变其延迟相位, 从而控制光子偏振度, 实现对自旋极化电子的极化方向的调制. 本文所用的 LCVR 具有补偿功能, 有效直径为 2.54cm, 相位延迟在 0—900nm 较大

波长范围内可变. 在自旋极化电子源中, 通常采用普通 1/4 波片或 Pockels 盒作为相位延迟器获得圆偏振光, 用 LCVR 取代它们, 其优点在于: 1) 单个 LCVR 即可满足不同波长的相位延迟的需要, 并且, 通过特定波长的现场校准, 可以获得高精度延迟, 而普通 1/4 波片可能具有不精确的延迟, 从而带来测量上的额外误差; 2) LCVR 的延迟可以通过电压进行调节, 从而避免使用普通 1/4 波片时的机械旋转; 3) LCVR 的延迟比起 Pockels 盒更少依赖于入射光的入射角, 可选用更大的直径; 4) LCVR 使用交流低电压(振幅 0—20V, 频率 2kHz 的方波), 而 Pockels 盒需要 2kV 以上的高压; 5) LCVR 响应时间虽没有 Pockels 盒快, 但也已达到毫秒量级. LCVR 这些优点为更高效率和精度的测量提供了基础.

2. 实验原理及装置

自旋极化电子束可通过多种方法获得^[7], 国际上普遍采用的是 GaAs 晶体光阴极方法. GaAs 晶体光致发射产生极化电子的一般理论和实验描述已有许多文献^[8-10]. GaAs 晶体的 Brillouin 区中心($K = 0$)附近的能级结构可见文献 [9], 其两重简并的 $S_{1/2}$ 能级导带上能产生自旋极化电子的关键在于, 自旋-轨道相互作用部分消除了六重简并的价带能级, 使其

* 国家自然科学基金(批准号: 10134010)资助的课题.

[†]E-mail: dinghaibing00@mails.tsinghua.edu.cn

分裂成为四重简并的 $P_{3/2}$ 能级和两重简并的 $P_{1/2}$ 能级,且两能级之间的能量差 $\Delta = 0.34\text{eV}$. 当用 $E_g \leq hv \leq E_g + \Delta$ 的正圆偏振光激发价带电子时,只能使 $P_{3/2}$ 能级的电子向导带跃迁. 根据跃迁选择定则 $\Delta m_j = \pm 1$, 导带上自旋向下的电子 ($m_j = -1/2$) 数目 N_{\downarrow} 为自旋向上的电子 ($m_j = +1/2$) 数目 N_{\uparrow} 的三倍 (由 Glebsch-Gordan 系数计算出), 这样导带上电子的极化度理论值为 $P_{th} = (N_{\uparrow} - N_{\downarrow}) / (N_{\uparrow} + N_{\downarrow}) = (1 - 3) / (1 + 3) = -50\%$, 其中负号代表极化方向向下. 同理负圆偏振光激发价带电子, $P_{th} = 50\%$, 极化方向向上.

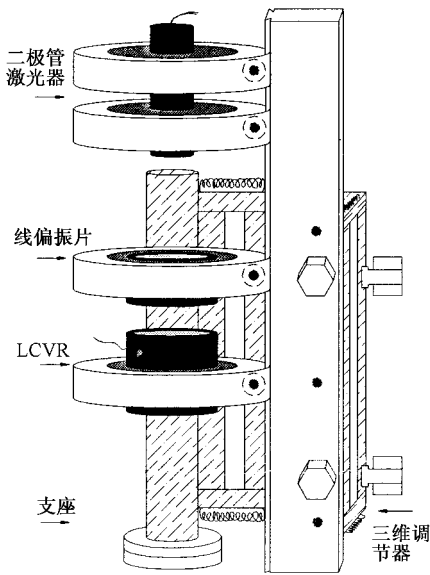


图 1 极化电子源激光光学系统装置

GaAs 极化电子源主要包括激光光学系统、Cs 配出器、 O_2 配出器、晶体热清洗装置、GaAs 光阴极、阳

极板、 90° 球偏转器、真空系统等. 激光光学系统是获得自旋极化电子束并可调制其极化方向的核心部件. 该装置 (如图 1 所示) 由二极管激光器、线偏振片、LCVR 组成. 二极管激光器提供 820nm 的近似线偏振光, 通过线偏振片和 LCVR, 变成圆偏振光, 并聚焦到经过特殊处理的活化过的 GaAs 晶体表面上, 光致电离发射电子, 电子自旋矢量在入射光子角动量方向上纵向极化. 所有光学元器件安装在特殊设计的支架上, 整体固定在极化源的法兰上. 该支架装置是至关重要的, 能够三维移动光学元器件, 以便得到和晶面的最好准直. 垂直向上发射的电子束通过一个 90° 静电型球偏器改变电子动量矢量, 而自旋不变, 从而使得出射电子束由纵向极化变为横向极化. LCVR 可通过计算机控制其数字接口驱动器改变其延迟相位, 通过校准使得其相当于一个对应 820nm 波长的 $1/4$ 波片 (或 $3/4$ 波片), 其快轴方向与偏振片偏振轴方向成 45° .

3. 电子束极化方向的调制

在自旋极化电子与原子分子碰撞的实验研究中, 为了消除仪器带来的不对称性, 需要分别用两束极化方向相反的电子束作为入射电子. LCVR 的引入便于调制电子束的极化方向.

根据前文对极化电子产生原理的描述, 我们知道电子束极化方向主要是由圆偏振光的螺旋性决定. 图 2 (a) 所示为产生自旋极化电子的结构示意图. 线偏振片的透光轴和 LCVR 快轴按图中排列, 计算机控制 LCVR 驱动器的输出电压, 使得 LCVR 的相位延迟对应 820nm 分别为 $1/4\lambda$ 和 $3/4\lambda$, 即可分别

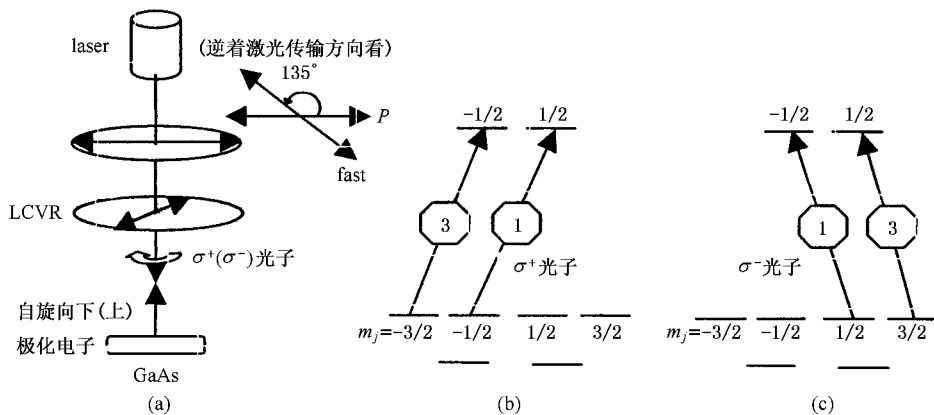


图 2 (a) 产生自旋极化电子的结构示意图 (b) 正圆偏振光 (σ^+ 光子) 入射, $P_e = -50\%$ (自旋向下) (c) 负圆偏振光 (σ^- 光子) 入射, $P_e = 50\%$ (自旋向上)

获得正圆偏振光和负圆偏振光,从而获得自旋向下和向上的电子束.图 2(b)描述了正圆偏振光激发 GaAs 价带电子到导带的跃迁,圆圈内的数字表示跃迁的相对概率,理论上的极化度为 -50%,负号表示自旋向下;同样图 2(c)描述负圆偏振光入射的情况,电子束极化方向为自旋向上.因此,通过 LCVR 可任何频率的转换圆偏振光的螺旋性,从而实现极化电子自旋方向的简单调节(受 LCVR 响应时间的限制).LCVR 无需任何物理移动,而普通 1/4 波片需变化角度.

4. 圆偏振光检测

入射圆偏振光的检测是获得自旋极化电子束并调制其极化方向的关键.线偏振片和 LCVR 按图 2(a)所示排列,由偏振光学原理可知,当 LCVR 分别对应于 1/4 波片和 3/4 波片时,获得圆偏振光的螺旋性分别是左旋和右旋.下面对 LCVR 进行校准,获得激光波长的 1/4λ 和 3/4λ 延迟所对应的电压.



图 3 自制旋转检偏器(SP 为旋转偏振片,SM 为步进电机,Ca 为光阴极,S_{out} 为电信号输出)

对应激光波长的 1/4λ 和 3/4λ 延迟的电压由下述方法确定:1)引入自制旋转检偏器放入图 1 装置的 LCVR 下方,自制旋转检偏器的结构如图 3 所示,由线偏振片、硅光电池、步进电机及转动部件构成.2)步进电机控制线偏振片旋转,入射光通过线偏振片后打在硅光电池上,光信号转换成电信号,通过示波器读出,波形呈周期性余弦平方的函数.3)通过计算机控制 LCVR 电压,随着延迟相位的改变,输出信号的波形随之改变,当输出信号的峰—峰值达到极大值时,入射为线偏振光,LCVR 对应该激光波长为 1/2λ 或 1λ 延迟,当输出信号峰—峰值达到极小值时,入射为圆偏振光,LCVR 对应 1/4λ 或 3/4λ 延迟.

前文已给出 LCVR 延迟相位的最大值在 0V 获得,随着电压的增加而减小.据此,经校准后该 LCVR 交流均方根电压 3100mV,2300mV,1850mV,1550mV 分别对应 1/4λ,1/2λ,3/4λ 和 1λ 延迟.图 4 所示为 LCVR 对应 1/4λ,1/2λ,3/4λ 和 1λ 延迟时自制旋转检偏器的输出波形.

5. 结 论

本文将 LCVR 引入到自旋极化电子源的光学系统中,经过校准,图 4(a)(c)分别对应左旋和右旋圆偏振光,获得自旋向下和向上的极化电子(b),(d)分别对应偏振方向相互垂直的两束线偏振光,获得非极化电子.通过计算机控制,自旋极化电子束的极化方向非常方便地得到调制,为自旋相关效应的实验研究奠定了基础.

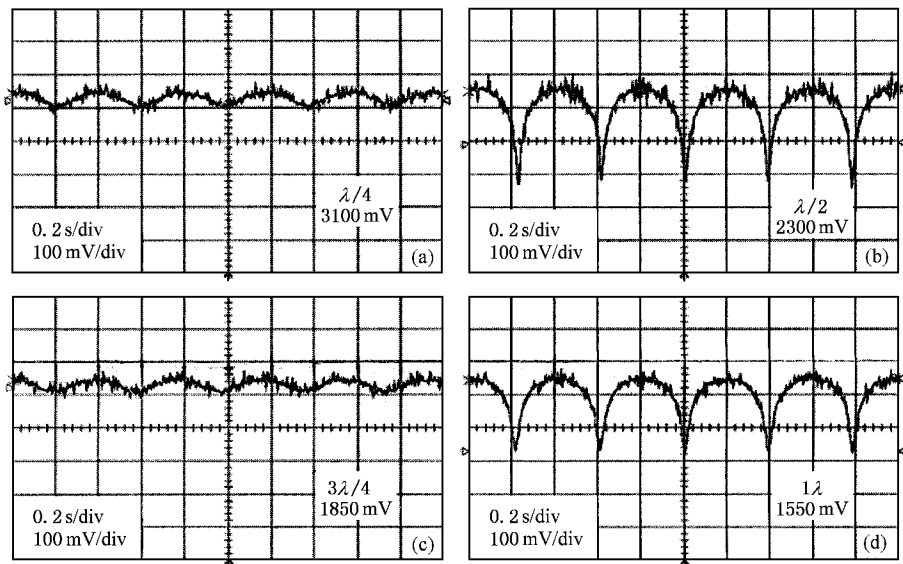


图 4 LCVR 对应 1/4λ,1/2λ,3/4λ 和 1λ 延迟时自制旋转检偏器的输出波形

理系 J. F. Williams 教授的邀请,半年的学术访问和实验工作让作者获益匪浅,同时也推进了本组的研究工作.

本文第一作者丁海兵感谢澳大利亚西澳大学(UWA)物

- [1] Chigrinov V G 1999 *Liquid crystal devices : Physics and applications* (Boston : Artech House) p1 , p287
- [2] Wei H Z , Zhang Z G , Chen S H *et al.* 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 1391 (in Chinese) [位恒政、张志刚、陈盛华等 2004 物理学报 **53** 1391]
- [3] Ge A M , Sui Z and Xu K S *et al.* 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 2481 (in Chinese) [葛爱明、隋展、徐克等 2003 物理学报 **52** 2481]
- [4] Gilman S E , Baur T G , Gallagher D J and Shankar N K 1990 *Proc. SPIE* **1166** 461
- [5] Juan M B 2000 *J. Opt. A : Pure Appl. Opt.* **2** 216
- [6] Furst J E , Yu D H , Hayes P A , D 'Souza C M and Williams J F 1996 *Rev. Sci. Instrum.* **67** 3813
- [7] Pierce D T 1995 *Experimental Methods in the Physical Sciences Volume 29A-Atomic , Molecular and Optical Physics : Charged Particles* , edited by Dunning F B and Hulet R G (New York : Academic Press) p1
- [8] Pierce D T , Meier F and Zurcher P 1975 *Phys. Lett. A* **51** 465
- [9] Pierce D T , Celotta R J , Wang G C *et al.* 1980 *Rev. Sci. Instrum.* **51** 478
- [10] Ruan C J 2003 *Chinese Physics* **12** 483

Polarization direction modulation for spin-polarized electrons with liquid crystal variable retarder *

Ding Hai-Bing Pang Wen-Ning Liu Yi-Bao Shang Ren-Cheng

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

(Received 5 November 2004 ; revised manuscript received 2 December 2004)

Abstract

The production of spin-polarized electrons and the modulation of polarization direction with liquid crystal variable retarder (LCVR) are discussed. The LCVR can play the roles of $1/4$, $1/2$, $3/4$ and whole-wave plates with special voltages in the optical system. And the advantages of using LCVR instead of Pockels cell and $1/4\lambda$ plate are the insensitivity to the incident photon direction , and the variability of retardation over a large wavelength range without mechanical movement. The polarization direction of spin-polarized electrons can be modulated easily by switching the helicity of the circularly polarized light. In order to determine the photon polarization , the spinning polarimeter is developed. And the result is also described.

Keywords : spin-polarized electron source , liquid crystal variable retarder , polarization direction

PACC : 2925B , 4210N , 4225J

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 10134010).