

# 液晶相位可变延迟器对光偏振态的调制\*

丁海兵 庞文宁 刘义保 尚仁成

(清华大学物理系,北京 100084)

**摘 要** 利用液晶相位可变延迟器(liquid crystal variable retarder, LCVR)的延迟相位随着其驱动电压连续可调特性,实现光偏振态的可控调制. 设计了旋转检偏器,对 LCVR 进行 820nm 激光波长的现场校准,获得  $1/4\lambda$ 、 $3/4\lambda$  和  $1/2\lambda$ 、 $1\lambda$  相位延迟所对应的驱动电压,计算机控制其驱动电压实现对光偏振态的调制,并进行了检验,给出了理论分析和实验结果. 该方法具有对光子入射方向不敏感、无需机械转动、适用较宽波长范围、实时可控等优点.

**关键词** 物理光学;液晶相位可变延迟器;相位延迟;偏振态

**中图分类号** O433 **文献标识码** A

## 0 引言

通常,光学系统中使用波片对偏振光的偏振态进行调制和测量. 随着液晶技术的日趋成熟,其在光学系统中得到了广泛的应用<sup>[1~6]</sup>. 向列相液晶具有介电各向异性特征,可被指向形成双折射层. 根据这一特性,可制备大孔径的相位可调延迟器,即液晶相位可变延迟器(LCVR). 向列型液晶具有电偶极矩,施加电场趋向于使其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,从而实现延迟相位的连续可调. LCVR 的原理及特性在参考文献[7]中给出.

本文所用 LCVR 为美国 Meadowlark 公司产品,具有补偿功能,有效直径为 2.54 cm,输入电压 0~20 V 可调,650~950 nm 波长范围内反射比小于 0.5%,波长延迟范围 0~900 nm. 用 LCVR 替代四分之一波片进行激光偏振态调制,可满足不同波长激光的相位延迟的需要,通过对特定波长的校准可获得高准确度延迟;LCVR 延迟可由计算机控制其输入电压进行调节,无需机械转动,且响应时间达到毫秒量级;更少依赖于入射角度. 这些优点为更高效率和准确度的控制与测量提供了基础. LCVR 在光的偏振分析与测量方面已得到了应用<sup>[8~10]</sup>,本文主要描述其在激光偏振态调制方面的应用,通过计算机控制 LCVR 驱动电压,改变其延迟相位,从而实现了对激光偏振态的调制.

## 1 实验原理及装置

如图 1,当一束振幅为  $E_0$  的单色线偏振光垂直

照射到 LCVR 时,入射线偏振光的偏振方向与 LCVR 快轴的夹角为  $\theta=45^\circ$ ,它将分解为沿 LCVR 快轴和慢轴方向振动的两个分量,相位相等,振幅也相等,  $|E_f|=E_0 \cos \theta=|E_s|=E_0 \sin \theta=\sqrt{2}/2E_0$ . 当这两个垂直分量从 LCVR(设 LCVR 的延迟为  $\delta$ )射出时,产生了  $\delta$  的相位差,位于快轴的分量在 LCVR 中速度较快,此时两个振动分量分别为

$$\begin{aligned} E_f &= \frac{\sqrt{2}}{2} E_0 \sin(\tau + \delta) \\ E_s &= \frac{\sqrt{2}}{2} E_0 \sin \tau \end{aligned} \quad (1)$$

LCVR 的延迟随着其驱动电压的调节可连续改变. 经过校准,其延迟  $\delta=1/4\lambda$ 、 $3/4\lambda$ 、 $1/2\lambda$  和  $1\lambda$  可在不同驱动电压下分别精确获得. 分别将延迟  $\delta=1/4\lambda$ 、 $3/4\lambda$ 、 $1/2\lambda$  和  $1\lambda$  代入式(1)中,再将两个振动分量叠加,可依次获得左旋、右旋圆偏振光以及水平和垂直振动方向的线偏振光(如图 1).

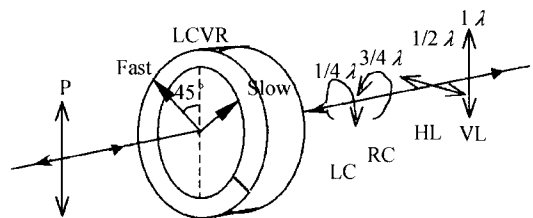


图 1 LCVR 对入射光偏振态的调制

Fig. 1 Optics principle of photon polarization modulation with LCVR

图 2 为激光偏振态调制光学系统,该装置由二极管激光器(L)、线偏振片(P)、液晶相位可变延迟器(LCVR)、旋转偏振片(SP)、步进电机(SM)、光阴极(Ca)、电信号输出( $S_{out}$ )及自制旋转检偏器组成. 所有光学器件镶嵌在特制的支座内,可绕轴转动. 而所有光学器件的支座统一固定在滑槽上,对中排列,并可自由滑动. 二极管激光器提供 820 nm 的近似线偏振光,线偏振片 P 的透射轴与 LCVR 快轴的

\*国家自然科学基金重点基金(10134010)资助

Tel: 010-62772691

Email: dinghaibing00@mails. tsinghua. edu. cn

收稿日期: 2005-06-25

夹角为  $45^\circ$ ，如图 1。自制旋转检偏器用于校准 LCVR，其具体用法将在下节详细介绍。通过计算机控制 LCVR 数字接口驱动器输出特定电压，改变 LCVR 的延迟相位(电压与延迟的关系已事先经过校准，具体方法见下节)，分别获得  $1/4\lambda$ 、 $3/4\lambda$ 、 $1/2\lambda$  和  $1\lambda$  延迟，则从 LCVR 射出的光依次为左旋、右旋圆偏振光以及水平和垂直振动方向的线偏振光。由此可见，光学系统中 LCVR 取代普通波片，无需任何物理移动，通过计算机控制其电压来改变延迟，即可实现对激光偏振态任何频率的简单调制(但受其响应时间限制)。

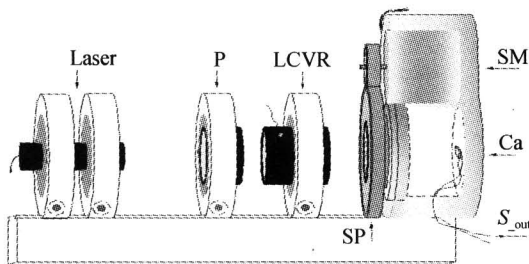


图 2 激光偏振态调制系统装置

Fig. 2 The experimental set-up for photon polarization modulation

## 2 LCVR 校准

为了实现对激光偏振态的精确调制，必须对 LCVR 进行校准，确定激光波长的  $1/4\lambda$ 、 $3/4\lambda$  和  $1/2\lambda$ 、 $1\lambda$  延迟所对应的驱动电压。为此自行设计了旋转检偏器(如图 2 中右侧部件)，由旋转线偏振片(SP)、硅光电池阴极(Ca)、步进电机(SM)及转动联接部件构成，通过示波器检测透过线偏振片后激光光强的变化。LCVR 可按下述方法进行校准：1) 将自制旋转检偏器放入图 2 装置的 LCVR 后方；2) 步进电机控制线偏振片匀速旋转，入射光通过线性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形式；3) 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，LCVR 出射光为线偏振光，LCVR 对应该激光波长的  $1/2\lambda$  或  $1\lambda$  延迟；当输出信号峰—峰值达到极小值时，LCVR 出射光为圆偏振光，LCVR 对应  $1/4\lambda$  或  $3/4\lambda$  延迟。

图 3 为自制旋转检偏器的输出波形。图中显示了峰—峰值极小和极大两种情况，当峰—峰值极小时，LCVR 延迟为  $1/4\lambda$  或  $3/4\lambda$ ；峰—峰值极大情况，LCVR 延迟为  $1/2\lambda$  或  $1\lambda$ 。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 对应的  $1/4\lambda$ 、 $1/2\lambda$ 、 $3/4\lambda$  和  $1\lambda$  延迟的交流均方根驱动电压分别为  $3.120 V$ 、 $2.240 V$ 、

$1.830 V$ 、 $1.535 V$ 。注意此处 LCVR 校准是对应二极管激光器  $820 nm$  输出波长进行的。如果使用其它波长( $650\sim 950 nm$ )，还需要重新校准。可见，经过实时校准，LCVR 可在非常宽的波段范围内实现精确延迟，克服了普通波片只适用特定波长的缺陷。

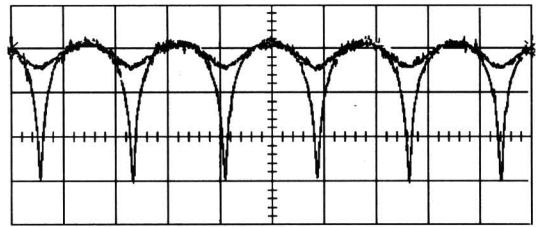


图 3 LCVR 对应  $1/4\lambda$ 、 $3/4\lambda$  和  $1/2\lambda$ 、 $1\lambda$  延迟时自制旋转检偏器的输出波形

Fig. 3 Output of spinning polarimeter when calibrating the LCVR

## 3 光子偏振态的检测

偏振态的检测在偏振光应用和偏振器件研制中至关重要，可通过自制旋转检偏器完成，其线偏振片 SP 的特征方向已事先标定。本文只针对上文提及的 LCVR 出射的特殊偏振光(左旋、右旋圆偏振光，以及线偏振光)进行检测。

线偏振光检测方法如下：如图 2，手动旋转自制检偏器的 SP，在其旋转一周过程中，若出现两处位置使得光强极大，另有两处位置使得光强为零，则待分析光为线偏振光，光的振动方向平行于光强极大时 SP 的特征方向。经过检验，结果表明 LCVR 电压为  $2.240 V$ 、 $1.535 V$ ，即延迟为  $1/2\lambda$  和  $1\lambda$  时，LCVR 出射光为线偏振光，其振动方向分别为水平和垂直方向。

圆偏振光的检测方法如上所述，如果在 SP 旋转一周的过程中，光强不变，则待测光为圆偏振光。进一步检测其螺旋性，设计了图 4 光路，在 LCVR 后插入一个  $1/4\lambda$  波片。当圆偏振光垂直入射  $1/4\lambda$  波片时，可分解为两个正交的相位差为  $90^\circ$  的线偏振光，当入射为右旋圆偏振光， $1/4\lambda$  波片出射为线偏振光，其振动方向顺时针旋转  $45^\circ$  后与  $1/4\lambda$  波片慢轴重合；若入射为左旋圆偏振光，则出射的线偏振光的振动方向逆时针旋转  $45^\circ$  后与  $1/4\lambda$  波片慢轴重

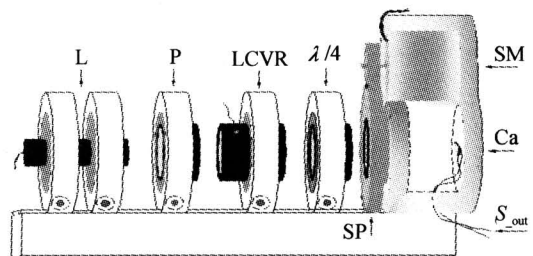


图 4 激光偏振态检测光路

Fig. 4 The experimental set-up for photon polarization test

合. 图 1 光路的逆光路显示了这一过程(此时  $1/4\lambda$  波片相当于 LCVR 取  $1/4\lambda$  延迟). 经过检验, 结果表明 LCVR 的电压为 3.120 V、1.830 V, 即延迟为  $1/4\lambda$  和  $3/4\lambda$  时, LCVR 出射圆偏振光, 其螺旋性分别为左旋和右旋.

## 4 结论

LCVR 引入到光学系统中, 经过校准, 可以在 650~950 nm 的波长范围内, 对入射光进行 0~ $1\lambda$  相位的延迟. 本文针对 820 nm 波长的激光, 经过校准, 获得其对应  $1/4\lambda$ 、 $1/2\lambda$ 、 $3/4\lambda$  和  $1\lambda$  相位延迟的驱动电压, 通过计算机控制, 非常方便的实现对激光偏振态的调制.

**致谢** 感谢澳大利亚西澳大学(UWA)物理系 J F Williams 教授提供的访问机会. 与对方的合作研究拓宽了作者的思路, 获益匪浅.

### 参考文献

- 1 Chigrinov V G. Liquid crystal devices: physics and applications. Boston: Artech House, 1999. 1~287
- 2 陈怀新, 魏宏刚, 陈祯培, 等. 采用液晶空间光调制器的可控性阵列菲涅耳波带片. 光子学报, 2001, **30**(15): 562~566  
Chen H X, Wei H G, Chen Z P, *et al.* *Acta Photonica Sinica*, 2001, **30**(15): 562~566
- 3 王琼华, 成建波. 带有补偿膜的扭曲相列液晶宽带快速偏振光开关. 光子学报, 2005, **34**(3): 357~360  
Wang Q H, Cheng J B. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(3): 357~360
- 4 郑臻荣. 液晶投影显示复眼照明的容差模拟分析. 光子学报, 2004, **33**(5): 593~597  
Zheng Z R. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(5): 593~597
- 5 申溯, 余俊. 一种反射式扭曲向列型液晶显示优化设计的新方法. 光子学报, 2005, **34**(4): 520~524  
Shen S, She J. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(4): 520~524
- 6 任常愚, 孙秀冬. 向列相液晶动态全息存储特性的研究. 光子学报, 2005, **34**(5): 785~788  
Ren CY, Sun X D. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(5): 785~788
- 7 Gilman S E, Baur T G, Gallagher D J, *et al.* Properties of tunable nematic liquid-crystal retarders. *SPIE*, 1990, **1166**: 461~471
- 8 Juan M B. Polarimetry using liquid-crystal variable retarders; theory and calibration. *J Opt A: Pure Appl Opt*, 2000, **2**(3): 216~222
- 9 Furst J E, Yu D H, Hayes P A, *et al.* Liquid crystal variable retarders in atomic scattering. *Rev Sci Instrum*, 1996, **67**(11): 3813~3817
- 10 Markhotok A, Bayram S B, Sieradzan A, *et al.* Precision polarization measurements of the  $6s^2 S_{1/2} \rightarrow 6p^2 P_j$  Rayleigh scattering spectrum in atomic Cs. *Journal of Applied Physics*, 2002, **92**(3): 1613~1618

## Photon Polarization Modulation with Liquid Crystal Variable Retarder

Ding Haibing, Pang Wenning, Liu Yibao, Shang Rencheng

*Department of Physics, Tsinghua University, Beijing 100084*

Received date: 2005-06-25

**Abstract** The modulation of photon polarization by liquid crystal variable retarder (LCVR) whose phase retardation can be controlled easily by its driving voltage is described. A spinning polarimeter is designed to calibrate the LCVR for 820nm wavelength in situ. The driving voltages corresponding to  $1/4\lambda$ ,  $3/4\lambda$ ,  $1/2\lambda$  and  $1\lambda$  of LCVR are obtained, and the polarization of photon is modulated by changing the driving voltage via a computer. The theoretical analysis and experimental result are presented. The advantages of the proposed method are insensitivity to the incident photon direction, large wavelength range without mechanical movement, and real-time control.

**Keywords** Physical optics; Liquid crystal variable retarder; Phase retardation; Polarization



**Ding Haibing** was born on March 9<sup>th</sup> 1977 in Jiangsu Province. He received the Bachelor's degree of physics from Xi'an Jiaotong University in 2000. Up to now he is pursuing Ph. D degree in Physics Department of Tsinghua University. His research field is Stokes parameters measurement in spin-polarized electron-atom collision, including the light modulation of incident laser and polarization analyzing of radiation.