

# 双折射率色散效应对液晶可调光衰减器的影响

沈志学, 张大勇, 李剑峰, 骆永全, 罗 飞

(中国工程物理研究院 流体物理研究所, 四川 绵阳 621900)

**摘要:**文章利用 Jones 矩阵方法计算和分析了双折射率色散效应对一种液晶可调光衰减器 (VOA) 衰减能力的影响。结果表明, 当激光谱线宽度较窄时, 双折射率色散效应将导致液晶 VOA 的光衰减能力大幅度减弱; 反之, 双折射率色散效应对液晶 VOA 光衰减能力的影响可以忽略, 但液晶 VOA 本身的光衰减能力很低。因此, 液晶 VOA 适用于较窄线宽的激光光源, 在设计和使用时应充分考虑液晶双折射率色散效应对其光衰减能力的影响。

**关键词:**液晶; 可调光衰减器; 双折射率色散; 线宽; 衰减能力

**中图分类号:** O436.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1005-8788(2010)01-0048-03

## Effects of birefringent dispersion on a liquid crystal variable optical attenuator

Shen Zhixue, Zhang Dayong, Li Jianfeng, Luo Yongquan, Luo Fei

(Institute of Fluid Physics, CAEP, Mianyang 621900, China)

**Abstract:** Effects of birefringent dispersion on the capability of a liquid crystal Variable Optical Attenuator (VOA) are analyzed by the Jones matrix method. The results indicate that birefringent dispersion greatly weakens its attenuating capability when working on lasers with narrow linewidths. But when it works on lasers with wider linewidths, the effects are negligible, but inevitably accompanied with a fading attenuating capability. Therefore, it is appropriate that liquid crystal VOA work on lasers with narrow linewidths and that full consideration be given to the effects of birefringent dispersion on VOA attenuating capability in its design and application.

**Key words:** liquid crystal; VOA; birefringent dispersion; linewidth; attenuating capability

## 1 概 述

可调光衰减器 (VOA) 是光通信系统中的关键器件之一, 广泛应用于密集波分复用 (DWDM) 系统中各信道的光功率均衡和光自动增益均衡<sup>[1]</sup>。目前, 多种类型的动态 VOA 或功率均衡器已经应用到 DWDM 系统中, 使用的技术包括微光机调制阵列、Mach-Zender 干涉仪、阵列波导光栅、声光可调滤光片、LiNbO<sub>3</sub> 相移阵列和液晶 VOA<sup>[2]</sup>。其中液晶 VOA 的控制电压低、动态范围大、调节精度高, 并且可以在宽波段范围内实现对任意波长激光的光强连续调节, 因此在光纤通信、光电检测等领域具有广泛的应用前景。

任何实际的激光光源, 其谱线总是分布在一定的宽度内, 因此对工作在特定波长的液晶 VOA, 液晶材料双折射率色散效应的存在可能会对其动态范围产生一定程度的影响。本文利用 Jones 矩阵计算和分析了在不同激光线宽情况下, 双折射率色散效应对液晶 VOA 的光衰减能力和动态范围的影响, 希望能为液晶 VOA 的设计和使用提供参考和帮助。

## 2 基本原理

### 2.1 几种光学元件的 Jones 矩阵

#### (1) 偏振器<sup>[3]</sup>

设有一沿  $Z$  向传输的线偏振光, 其偏振方向平行于  $X$  轴, 垂直入射到偏振器表面上, 该偏振器保持入射线偏振态不变情况下的最大透过系数为  $t_x$ , 称这时偏振器的方向为  $X$  方向, 相应条件下最小透过系数为  $t_y$ , 则偏振器的 Jones 矩阵可用这两个正交方向上的透过系数来表示:

$$\mathbf{J}_p = \begin{bmatrix} t_x & 0 \\ 0 & t_y \end{bmatrix} = t_x \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \epsilon \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中,  $\epsilon^2 = (t_y/t_x)^2$  为偏振器的消光比。

#### (2) 液晶波片<sup>[4]</sup>

液晶波片的 Jones 矩阵如下:

$$\mathbf{J}_{LC} = \begin{bmatrix} \cos\alpha & -\sin\alpha \\ \sin\alpha & \cos\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & e^{i\delta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\alpha & \sin\alpha \\ -\sin\alpha & \cos\alpha \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中,  $\alpha$  为液晶光轴与  $X$  轴的夹角;  $\delta = (2\pi/\lambda) \cdot \Delta n \cdot d$  为液晶波片的相位延迟;  $\Delta n$  为液晶材料的双折射率之差;  $d$  为液晶波片内的液晶层厚度。

## 2.2 VOA 器件透过率推导

液晶波片由玻璃基板、透明电极(复化铟锡膜层,ITO 膜层)、取向膜层、隔垫和液晶层几个部分组成,如图 1 所示,其中涂覆的取向膜层经过摩擦处理后,可使液晶分子按照特定取向排列,使液晶层具有类似晶体的光学性质,ITO 膜层作为透明电极可为液晶层提供沿光传播方向的电场。

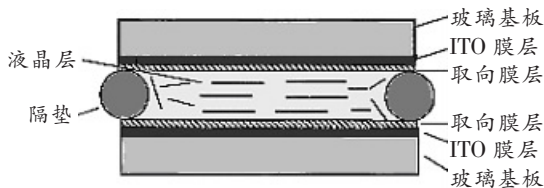


图 1 液晶波片结构示意图

在不加电场的情况下,液晶分子沿着与玻璃基板平行的方向排列,由于液晶材料的双折射效应,该液晶波片对入射光具有一定的位相延迟  $\delta$ ; 在外加电场作用下,当电场强度达到 Friedericksz 转变阈值时,液晶层中分子的指向将发生偏转,趋于与电场平行的方向;分子指向偏转的程度与外加电场的大小有关<sup>[5]</sup>。与分子指向未发生偏转时的情况相比,液晶层的等效折射率差  $\Delta n$  减小,液晶波片的延迟量  $\delta$  降低,因此通过调节在液晶层内施加电场大小可以控制液晶波片的延迟,这就是液晶的电控双折射效应。

液晶 VOA 的结构及测试光路如图 2 所示,将液晶波片(LC plate)放置于两个透振方向相互垂直的偏振器(起偏器、检偏器)之间,其光轴方向与起偏器成  $45^\circ$  角,液晶波片的驱动器(Driver)通过 ITO 膜层给液晶层引入一个强度可控的电场。

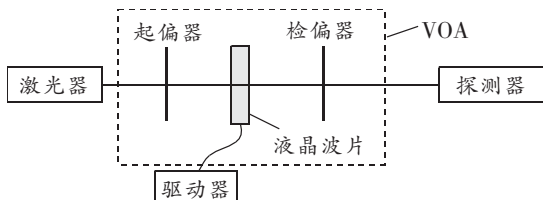


图 2 液晶 VOA 结构及测试光路

一单位振幅的水平线偏振光(假设沿  $X$  轴)通过如图 2 所示的光路后,透射光的振幅可以利用 Jones 矩阵推导如下:

$$\begin{aligned} \mathbf{E}_{\text{out}} &= \mathbf{J}_a \cdot \mathbf{J}_{\text{LC}} \cdot \mathbf{J}_p \cdot \mathbf{E}_{\text{in}} = t_x \begin{bmatrix} \epsilon & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \times \\ &\begin{bmatrix} \cos\alpha & -\sin\alpha \\ \sin\alpha & \cos\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & e^{j\delta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\alpha & \sin\alpha \\ -\sin\alpha & \cos\alpha \end{bmatrix} \end{aligned}$$

$$t_x \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \epsilon \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} = t_x^2 \begin{bmatrix} \epsilon \cos \frac{\delta}{2} e^{i\delta} \\ \sin \frac{\delta}{2} e^{i(\delta-\pi/2)} \end{bmatrix}, \quad (3)$$

由式(3)可以得到液晶 VOA 对上述线偏振光的透过率为

$$T_{\perp} = \left| \frac{E_{\text{out}}}{E_{\text{in}}} \right|^2 = t_x^4 \left[ \epsilon^2 \cos^2 \left( \frac{\delta}{2} \right) + \sin^2 \left( \frac{\delta}{2} \right) \right]. \quad (4)$$

考虑液晶材料的色散特性,即  $n_e$  (液晶波片对  $e$  光分量的折射率) 和  $n_o$  (液晶波片对  $o$  光分量的折射率) 均是波长的函数的情况,透过率可以表示为

$$\begin{cases} T(\lambda) = t_x^4 \left[ \epsilon^2 \cos^2 \left( \frac{\delta}{2} \right) + \sin^2 \left( \frac{\delta}{2} \right) \right] \\ \delta = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \Delta n \cdot d = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot (n_e - n_o) \cdot d. \end{cases} \quad (5)$$

考虑液晶材料双折射率色散的情况下,  $n_e$  和  $n_o$  可以用 Cauchy 方程来描述<sup>[6]</sup>:

$$n_e = A_e + B_e/\lambda^2 + C_e/\lambda^4, \quad (6)$$

$$n_o = A_o + B_o/\lambda^2 + C_o/\lambda^4, \quad (7)$$

式(6)和式(7)适用于单组分或混合物液晶。

以 5CB 液晶为例,当环境温度为  $T = 298.1 \text{ K}$  时, Cauchy 方程的各项系数见表 1。

表 1 Cauchy 方程系数

| 参 数                 | 数 值      |
|---------------------|----------|
| $A_e$               | 1.679 46 |
| $B_e/\mu\text{m}^2$ | 0.004 82 |
| $C_e/\mu\text{m}^4$ | 0.002 73 |
| $A_o$               | 1.518 66 |
| $B_o/\mu\text{m}^2$ | 0.001 63 |
| $C_o/\mu\text{m}^4$ | 0.001 14 |

由表 1 中的参数可以得到 5CB 液晶在环境温度为  $298.1 \text{ K}$  时的色散曲线,如图 3 所示。

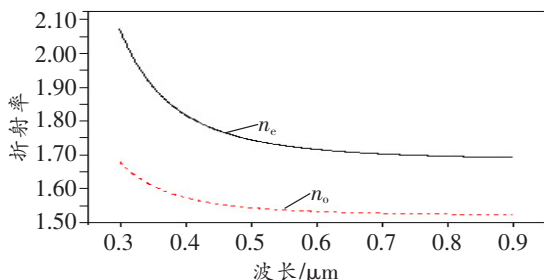


图 3 5CB 液晶折射率色散曲线

## 2.3 色散效应的影响

对于具有一定线宽的激光光源来说,在其谱线宽度 ( $\lambda_1, \lambda_2$ ) 内,对应特定波长上的强度  $I(\lambda)$  与该波长的光子数成正比,即

$$I(\lambda) \sim N(\lambda) \frac{hc}{\lambda}, \quad (8)$$

式中,  $N(\lambda)$  为激光在波长上的光子数,  $h$  为普朗克常数,  $c$  为真空中的光速。

如上所述, 基于图 2 所示原理的液晶 VOA 存在色散效应, 是一种透过率与波长相关的光学器件。根据液晶 VOA 的光强透过率对波长的依赖关系, 对于谱线宽度为  $(\lambda_1, \lambda_2)$  的激光光源, 通过液晶 VOA 的透过率可以表述为

或

$$T = \frac{\left[ \sum_i T(\lambda_i) N_i \frac{hc}{\lambda_i} \right] / \left[ \sum_i N_i \frac{hc}{\lambda_i} \right]}{- \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} T(\lambda) N(\lambda) \frac{hc}{\lambda^2} d\lambda} \quad (9)$$

$- \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} N(\lambda) \frac{hc}{\lambda^2} d\lambda$

显然式(9)适用于任何光学器件透过率的计算。

根据式(5)~(9), 本文计算了具有不同线宽的激光光源通过液晶 VOA 后的透过率, 进而分析了液晶材料的双折射率色散效应对 VOA 动态范围的影响。这里考虑工作在 532 nm 波长的液晶 VOA, 其透过率曲线如图 4 所示。

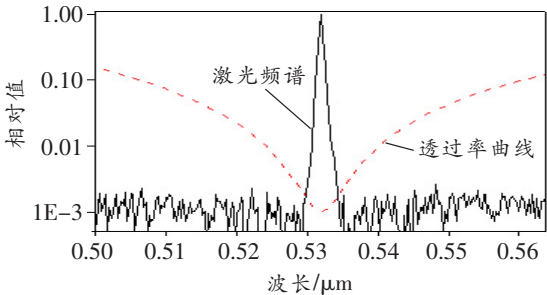


图 4 VOA 理想衰减曲线与 532 nm 激光谱线

在考虑液晶材料的双折射率色散和忽略色散两种情况下, 对具有不同谱线宽度的 532 nm 激光, 通过计算得到液晶 VOA 对激光的最大衰减能力随激光谱线半极大值全宽度(FWHM)的变化情况如图 5 所示。计算时液晶 VOA 采用的参数如下: 5CB 液晶(298.1 K),  $\Delta n = 0.1064$  (通过驱动器控制), 振荡器消光比  $\epsilon^2 = 0.001$ , 液晶层厚度  $d = 10 \mu\text{m}$ , 并假设 532 nm 激光的谱线宽度在 1~16 nm 之间变

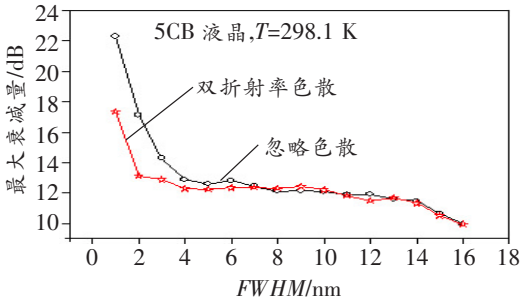


图 5 VOA 器件的衰减能力随激光线宽的变化

化, 其激光光谱具有图 4 所示的形状。

由图 5 的计算结果可以得到如下结论:

- (1) 在上述两种情况下, 激光线宽越窄, 液晶 VOA 对 532 nm 激光的衰减能力越强。
- (2) 当激光线宽较窄时, 两种情况的计算结果差别较大, 并且在考虑双折射率色散效应情况下液晶 VOA 对激光的衰减能力较弱。这种现象表明, 当激光谱线宽度较小时, 液晶材料的双折射率色散效应使器件对激光的衰减能力较之理想情况大大减弱, 即双折射率色散效应的影响比较显著。
- (3) 随着激光线宽的逐步增大, 在上述两种情况下, 计算结果之间的差异越来越小。这说明激光的谱线宽度越大, 双折射率色散效应对液晶 VOA 光衰减能力的影响越小; 当激光的线宽增大到一定程度后, 两条曲线趋于重合, 这表明双折射率色散的影响可以忽略。但很显然的是, 对于较大线宽的激光光源, 液晶 VOA 的衰减能力是很弱的, 即液晶 VOA 不适用于较大线宽的激光光源。

从上述的计算和分析结果可以看出, 液晶 VOA 只适用于线宽较窄的激光光源, 并且在设计和使用, 应充分考虑液晶材料的双折射率色散效应对其衰减能力的影响。

3 结束语

针对不同谱线宽度的激光光源, 基于 Jones 矩阵计算分析了液晶材料的双折射率色散效应对液晶 VOA 的光衰减能力的影响。结果表明, 液晶 VOA 在设计和使用过程中, 应考虑激光光源的线宽和液晶材料的色散效应等因素的影响。研究结果对液晶 VOA 关键参数的设计和性能的改进具有重要的参考价值。

参考文献:

[1] 李鹰, 江晓清, 李锡华, 等. 光可变衰减器的研究进展 [J]. 光通信研究, 2004, (4): 67-70.

[2] Pan R P. Liquid crystal enabled multi-channel power equalizer and stabilizer [J]. Optics Communications, 2007, 278: 329-333.

[3] 廖延彪. 偏振光学 [M]. 北京: 科学出版社, 2003. 57-58.

[4] 葛琦, 曾繁清. 基于平行式液晶技术的可变光衰减器 [J]. 半导体光电, 2004, 25: 32-34.

[5] 黄子强. 液晶显示原理 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2008. 120-130.

[6] Li Jun, Wu Shin-Tson. Extended Cauchy equations for the refractive indices of liquid crystals [J]. J Appl Phys, 2004, 95: 896-901.