

斜入射下液晶偏振光栅衍射特性研究

郑青泉¹, 王春阳^{1,2*}, 王子硕², 王 增¹, 康 丁¹

(1. 西安工业大学 兵器科学与技术学院, 陕西 西安 710021;
2. 长春理工大学 电子信息工程学院, 吉林 长春 130022)

摘要: 为了表征光束倾斜入射下液晶偏振光栅的衍射特性, 提出了液晶偏振光栅斜入射角度-驱动电压-衍射效率的三维模型建模方法。该方法利用吉布斯自由能方程, 求解液晶分子指向矢, 得到驱动电压与液晶分子倾斜角的表达式, 推导出斜入射角度与相位延迟量之间的关系, 结合扩展琼斯矩阵表征不同入射角度下液晶偏振光栅的透过率, 通过矢量衍射理论, 建立了斜入射角度-驱动电压-衍射效率的三维模型。该模型不仅可以定量求解不同斜入射角度下液晶偏振光栅衍射效率, 而且能够实现衍射效率最优时驱动电压的标定。通过仿真分析和实验对该模型的有效性进行了验证, 结果表明: 光束入射角度从 0° 倾斜到 10° 时, 最优驱动电压由 2.2 V 降低到 2.0 V, 液晶偏振光栅衍射效率从 85% 下降到 78%; 光束入射角度从 0° 倾斜到 -10° 时, 最优驱动电压由 2.2 V 升高到 2.4 V, 液晶偏振光栅衍射效率从 85% 下降到 74%。

关键词: 液晶偏振光栅; 指向矢; 扩展琼斯矩阵; 斜入射; 衍射效率

中图分类号: TN958.98 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20210511

Research on diffraction characteristics of liquid crystal polarization grating under oblique incidence

Zheng Qingquan¹, Wang Chunyang^{1,2*}, Wang Zishuo², Wang Zeng¹, Kang Ding¹

(1. College of Ordnance Science and Technology, Xi'an Technological University, Xi'an 710072, China;

2. College of Electronic and Information Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

Abstract: To characterize the diffraction characteristics of the liquid crystal polarization grating when the beam is incident obliquely, a three-dimensional model modelling method of liquid crystal polarization grating oblique incident angle-driving voltage-diffraction efficiency was proposed. This method uses the Gibbs free energy equation to solve the director of the liquid crystal molecule, obtains the expression of the driving voltage and the tilt angle of the liquid crystal molecule, derives the relationship between the oblique incident angle and the phase retardation, and combines the extended Jones matrix to characterize different incident angles. The transmittance of the lower liquid crystal polarization grating, through the vector diffraction theory, establishes a three-dimensional model of oblique incident angle-driving voltage-diffraction efficiency. This model can not only quantitatively solve the diffraction efficiency of liquid crystal polarization gratings at different oblique incident angles, but also realize the calibration of the driving voltage when the diffraction efficiency is optimal. The effectiveness of the model was verified by simulation analysis and experiments. The results show that when the

收稿日期: 2021-12-05; 修订日期: 2022-01-25

基金项目: 中国博士后科学基金 (2020M673606XB)

作者简介: 郑青泉, 男, 硕士生, 主要研究方向为激光相控阵雷达技术。

导师(通讯作者)简介: 王春阳, 女, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为激光相控阵雷达技术、先进控制理论及技术。

beam incident angle is tilted from 0° to 10° , the optimal driving voltage is reduced from 2.2 V to 2.0 V, and the diffraction efficiency of the liquid crystal polarization grating is reduced from 85% to 78%; when the beam incident angle is tilted from 0° to -10° , the optimal driving voltage is increased from 2.2 V to 2.4 V, and the diffraction efficiency of the liquid crystal polarization grating drops from 85% to 74%.

Key words: liquid crystal polarization grating; director; extended Jones matrix; oblique incidence; diffraction efficiency

0 引言

液晶偏振光栅是近些年发展起来的基于几何相位实现光束偏转的超薄衍射光学元件,相较于其他衍射光学元件,具有尺寸小、质量轻、响应速度快等优势^[1-3]。在激光雷达、空间光通信、激光对抗和激光武器等领域具有广泛的应用前景^[4-7]。

液晶偏振光栅作为激光相控阵雷达的核心器件,其光束衍射效率过低会造成探测距离下降和目标检测概率降低^[8],由于单片液晶偏振光栅光束偏转角度小且单一,因此,在实际使用过程中,需要将多片液晶偏振光栅级联^[9-11],实现大角度光束偏转。光栅的级联结构会造成光束倾斜入射,影响光栅衍射效率。目前,国内外已有学者对斜入射下液晶偏振光栅的衍射效率进行了定性研究。2013年,李天等人^[12]利用矢量傅里叶系数描述了斜入射下液晶偏振光栅的光束泄露问题并用实验测出了不同入射角度下液晶偏振光栅的衍射效率。2016年,赵祥杰等人^[13]分析了斜入射对液晶偏振光栅转向效率的影响,表明了过度倾斜的入射会消除入射光束的转向作用,将光束能量衍射到非闪耀级次。以上针对斜入射的研究,并没有给出具体模型,均是定性分析了光束斜入射对液晶偏振光栅衍射效率的影响,不能量化斜入射角度、电压、衍射效率三者的关系。因此,为了准确研究斜入射对液晶偏振光栅的电压和衍射效率的影响,文中通过对

液晶分子指向矢求解和斜入射下液晶偏振光栅的扩展琼斯矩阵计算方法的研究,建立了液晶偏振光栅斜入射角度-驱动电压-衍射效率的三维模型。利用该模型可计算出液晶偏振光栅衍射效率最优时的驱动电压,实现光栅快速标定,并且能对不同入射角度下液晶偏振光栅衍射效率进行量化分析。斜入射下液晶偏振光栅光束衍射效率的研究,对未来实现远距离、高精度的激光雷达具有重要意义。

1 斜入射下液晶偏振光栅衍射模型

1.1 液晶分子指向矢分布

液晶偏振光栅是由电控制双折射液晶材料组成。其基本原理是光束在通过液晶层时,液晶折射率呈现周期性差异分布,使得入射光的相位发生周期性变化,最终产生光栅效果^[14-15]。液晶指向矢是指在时间无限小的范围内液晶分子长轴的排列方向。在施加电压小于阈值电压的情况下,如图 1(a) 所示,液晶分子平行排列,其中 ϕ 是液晶分子方位角,它是液晶分子在 xy 平面上投影与 x 轴夹角,其角度呈周期性变化, θ 为液晶分子倾斜角,它是液晶分子指向式与 z 轴夹角。在电场的作用下,液晶分子倾角发生变化,液晶分子从平行排列转变为沿电场方向排列,如图 1(b) 所示。

液晶指向矢的数学表达式为: $\vec{n} = (\cos\theta\cos\phi,$

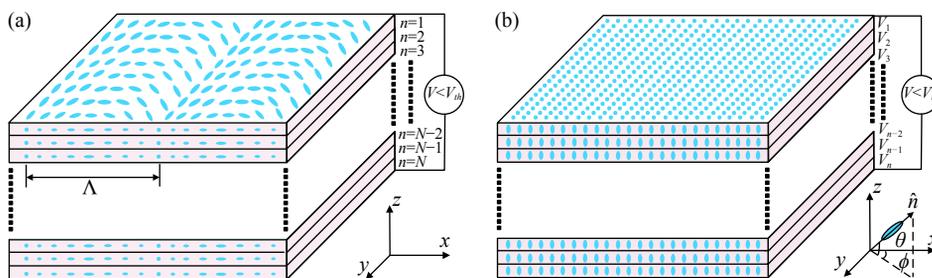


图 1 (a) 无驱动电压下液晶分子排布图; (b) 驱动电压下液晶分子排布图

Fig.1 (a) Molecular arrangement of liquid crystal without driving voltage; (b) Molecular arrangement of liquid crystal at driving voltage

$\cos\theta\sin\phi, \sin\theta$), 其中 θ 、 ϕ 分别为液晶分子的倾斜角和方位角。由图 1(b) 可知, 在外加电场时, 液晶分子指向矢会随倾斜角和方位角发生改变。根据液晶连续体弹性形变理论, 将指向矢代入液晶吉布斯自由能密度方程, 可得液晶吉布斯自由能密度具体表达式为:

$$f = \frac{1}{2} \left\{ m(\theta) \left(\frac{\partial\theta}{\partial z} \right)^2 + g(\theta, \phi) \left(\frac{\partial\phi}{\partial x} \right)^2 + h(\theta, \phi) - \left(\varepsilon_{\perp} + \Delta\varepsilon\sin^2\theta \right) \left(\frac{dv}{dz} \right)^2 \right\} \quad (1)$$

式中: $m(\theta) = (k_{11}\cos^2\theta + k_{33}\sin^2\theta)$; $g(\theta, \phi) = \cos^2\theta(k_{11}\sin^2\phi + k_{22}\cos^2\phi\sin^2\theta + k_{33}\cos^2\phi\cos^2\theta)$; $h(\theta, \phi) = (k_{22} - k_{11})\cos^2\theta\sin\phi$; k_{11} 、 k_{22} 、 k_{33} 为展曲、扭曲、弯曲弹性系数, 在驱动电压作用下, 液晶层中的自由能发生变化, 液晶分子发生重排。当液晶分子处于平衡状态时, 其吉布斯自由能密度最小。通过非线性最小二乘差分迭代法对指向矢求解^[16] 可以得到液晶分子倾斜角和位置关系, 如图 2 所示。

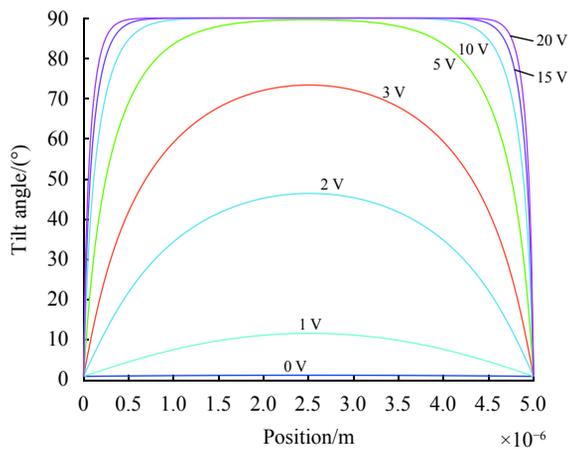


图 2 不同电压下液晶分子倾斜角分布

Fig.2 Distribution of liquid crystal molecular inclination angle at different voltages

由图可得液晶分子倾斜角是关于电压和位置的函数, 可将其记为 $\theta(z, v)$, 若要研究电压与液晶分子倾斜角的关系就必须选定某一位置, 因此需要对液晶偏振光栅进行分层, 而在利用最小二乘差分迭代法求解液晶指向矢的过程中, 已将厚度为 d 的液晶偏振光栅分成了 N 层, 每一层的电压都对应了一个液晶倾斜角, 因此第 n 层液晶分子倾斜角和电压的关系可表示为:

$$\theta_n = \theta_z(v), \left(z = \frac{d}{N}n, n = 1, 2, 3 \dots N \right) \quad (2)$$

由此可以求出每层不同电压对应的液晶分子倾斜角, 基于上述的分析与推导, 即可建立液晶分子在外电场作用下倾斜角与电势分布的关系。

1.2 斜入射下液晶偏振光栅相位延迟

当光束垂直入射在液晶层上时, 由于液晶分子寻常折射率 n_o 和非寻常折射率 n_e 的不同, 光束分成两部分, 即寻常光 (e 光) 和非寻常光 (o 光)^[17]。正常情况下, 入射光束必须垂直于液晶偏振光栅, 但是由于级联结构和实际使用环境, 入射光束很难时刻保证与光栅垂直, 必然会有斜入射的情况发生, 此时入射光与液晶分子夹角会发生变化。一般认为液晶分子是长棒状结构^[14], 其示意图如图 1 所示, 由于液晶分子形貌对入射光束影响较小, 在实际计算过程中, 可将其简化为图 3 中形式, 这样简化的好处是: 在垂直入射时, 可以近似认为液晶分子与入射光束夹角等于液晶分子倾斜角, 即 $\theta = \theta'$, 斜入射时, 入射光束与液晶分子夹角就可以用倾斜角和斜入射角度来表示。从图 3 可以看出, 斜入射时, 入射光束与液晶分子夹角发生了变化, 该情况下可以认为等同于液晶分子发生旋转。

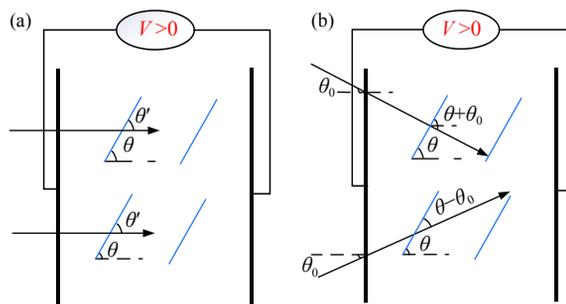


图 3 (a) 光束垂直入射模型; (b) 光束斜入射模型

Fig.3 (a) Vertical incident beam model; (b) Beam oblique incident model

若圆偏光以入射角 θ_0 倾斜入射在光栅上, 通过上述分析可知斜入射改变了液晶分子倾斜角, 此时, 光束通过液晶分子的相位延迟将发生改变。为了研究斜入射下液晶分子相位延迟量的变化, 建立坐标系使入射光在光栅 x 轴和 z 轴组成的平面上, 坐标系如图 4 所示。

图中, \hat{n} 为液晶分子指向矢, K_i 为入射光束矢量,

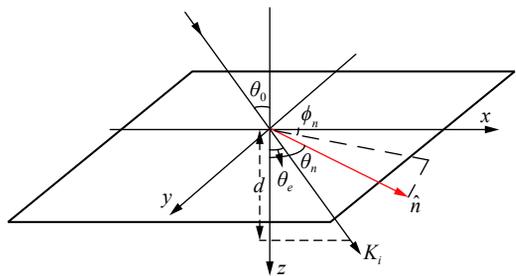


图 4 入射光矢量与指向矢关系图

Fig.4 Relation diagram between incident light vector and pointing vector

根据图 3 可得斜入射下 e 光和 o 光的 z 分量为^[18-20]:

$$k_{ez} = \frac{(n_e^2 - n_o^2) \sin \theta \cos \theta \cos \phi \sin \theta_0}{n^2} + \frac{n_o n_e}{n^2} \times \left\{ n^2 - \left[1 - \frac{n_e^2 - n_o^2}{n_e^2} \cos^2 \theta \sin^2 \phi \right] \sin^2 \theta_0 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

$$k_{oz} = \sqrt{n_o^2 - \sin^2 \theta_0} \quad (4)$$

式中: θ 为液晶分子在电场作用下的倾斜角; θ_0 为斜入射角度。斜入射时实际光程大于液晶盒厚度, 在图 4 中, 液晶盒厚度为 d , 入射光束矢量 K_i 在液晶中的传播角度为 θ_e , 由此关系图可得光束在实际传播过程中的光程为:

$$L = \frac{d}{\cos \theta_e} \quad (5)$$

通过公式 (3)~(5) 可以求出不同角度入射下液晶偏振光栅双折射相位延迟量:

$$\Gamma = |k_{ez} - k_{oz}|L \quad (6)$$

1.3 扩展琼斯矩阵

琼斯矩阵可以为研究光在各向异性介质中传播提供一种数值解法, 但是由于其不考虑光在液晶表面的 Fresnel 折射和反射问题, 因此其只适用于光垂直入射和近光轴传播情况, 当光束斜入射时, 使用常规的琼斯矩阵无法准确计算出入射光的状态变化。因此, 需要使用扩展琼斯矩阵描述光束在液晶偏振光栅中的传播过程^[12-13, 18-22], 在对光栅的光学特性进行数值模拟时, 将其分解成 N 层双折射晶体, 再假设在每层晶体之间有一个厚度为 0 的各向同性的介质, 当 N 足够大时, 每一层都可以被认为是具有特定光轴方向的单轴晶体, 入射在单轴晶体界面上的 o 光和 e 光在各向同性介质和单轴晶体的界面上, 光的折射可以用矩阵形式表示^[20]:

$$\begin{bmatrix} E_e \\ E_o \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R(p, e) & R(s, e) \\ R(p, o) & R(s, o) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_p \\ E_s \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中: E_e, E_o 为单轴晶体中的 e 向量和 o 向量; E_p, E_s 为各向同性介质中电场分量的 p 向量和 s 向量; $R(e, p), R(o, p), R(e, s), R(o, s)$ 为从液晶到各向同性介质的传播系数。

因此, 当光束从各向同性介质到单轴晶体, 然后又到另一个各向同性介质的光波传输矩阵为^[15,20]:

$$J = R_1 G R_2 \quad (8)$$

式中: $R_1 = \begin{bmatrix} R(e, p) & R(o, p) \\ R(e, s) & R(o, s) \end{bmatrix}; R_2 = \begin{bmatrix} R(p, e) & R(s, e) \\ R(p, o) & R(s, o) \end{bmatrix}; G = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & e^{i\Gamma} \end{bmatrix}; R_1$ 和 R_2 分别为入射矩阵和折射矩阵; G 为单层液晶的传输矩阵。矩阵传播系数表示为:

$$R(e, p) = R(p, e) = \frac{1}{A_e} (m + v) \cdot (n - u) \quad (9)$$

$$R(p, o) = R(o, p) = \frac{1}{A_o} \cos \theta \sin \phi \quad (10)$$

$$R(e, s) = -\frac{1}{A_e} \cos \theta \sin \theta (m + v) \quad (11)$$

$$R(s, o) = R(o, s) = \frac{1}{A_o} (n - u) \quad (12)$$

式中: $m = n_e(\theta_e) \cos \theta_0 \cos \theta_e; v = n_o \sin^2 \theta_0; u = \sin \theta_0 \sin \theta; n = \cos \theta_0 \cos \theta \cos \phi; \theta_e$ 为 e 光在液晶中的折射角; $n_e(\theta_e)$ 为 e 光在 θ_e 方向上的折射率, $\cos \theta_e = k_{ez}/n_e(\theta_e); \theta$ 为液晶指向矢的倾斜角; ϕ 为液晶偏振光栅方位角; A_o 和 A_e 是归一化常量。则:

$$A_o = [\sin^2 \phi \cos^2 \theta + (u - n)^2]^{\frac{1}{2}} \quad (13)$$

$$A_e = [n_e^2(\theta_e) \cos^2 \theta_e + v(n - u)^2 \times \cos^2 \theta \sin^2 \phi (m + v)^2]^{\frac{1}{2}} \quad (14)$$

实际计算过程中, 选择各向同性介质的折射率为 n_o , 由折射定律可知当 o 光从各向同性介质到液晶层的时候不发生折射。因一般情况下液晶的 n_o 和 n_e 差别较小, 由折射率椭球公式可知 e 光的折射率和 o 光的折射率是相等的, 因此上述各式中 θ_e 和 θ_0 也可以近似认为是相等的^[13, 20], 即: $n_e \approx n_o, \theta_e \approx \theta_0$, 这样可以简化计算且可将琼斯矩阵中各元素全部都用液晶参数和入射角来表示。基于上述分析将入射界面传输矩阵化简得:

$$R_1 = \begin{bmatrix} \frac{n - u}{A_o} & \frac{\sin \phi \cos \theta}{A_o} \\ -\frac{\sin \phi \cos \theta}{A_o} & \frac{n_o - u}{A_o} \end{bmatrix} \quad (15)$$

最终可将第 n 层液晶偏振光栅的扩展琼斯矩阵

化简为:

$$J_n = \begin{bmatrix} \left(\frac{\Delta}{A_o}\right)^2 \exp(i\Gamma) + \left(\frac{\sin\phi \cos\theta_n}{A_o}\right)^2 \left(\frac{\Delta \sin\phi \cos\theta_n}{A_o^2}\right) (1 - \exp(i\Gamma)) \\ \left(\frac{\Delta \sin\phi \cos\theta_n}{A_o^2}\right) (1 - \exp(i\Gamma)) \quad \left(\frac{\Delta}{A_o}\right)^2 + \left(\frac{\sin\phi \cos\theta_n}{A_o}\right)^2 \exp(i\Gamma) \end{bmatrix} \quad (16)$$

式中: $\Delta = \cos\phi \cos\theta_n \cos\theta_0 - \sin\theta_n \sin\theta_0$.

N 层液晶的总的琼斯矩阵为:

$$T = J = J_N J_{N-1} \times \dots \times J_n \times \dots \times J_3 J_2 J_1 \quad (17)$$

若入射光的琼斯矢量表达式为 $[E_{in_p} \quad E_{in_s}]^T$, 则出射光的琼斯矩阵为:

$$\begin{bmatrix} E_{out_p} \\ E_{out_s} \end{bmatrix} = T \begin{bmatrix} E_{in_p} \\ E_{in_s} \end{bmatrix} \quad (18)$$

基于上述的分析与推导可以看出,斜入射角度不同时,液晶偏振光栅的透过率也会发生变化,从而影响光栅衍射效率。值得注意的是,斜入射不仅会改变透过率,同时会改变入射光的偏振态并增加入射光束在光栅上的界面反射,对于级联系统,这些变化都会影响整个系统的衍射效率。

1.4 矢量衍射理论

根据光栅的矢量衍射理论^[13],光栅 m 级次的偏振特性和衍射效率由透射光场的矢量傅里叶变换系数决定。

$$D_m = \frac{1}{\Lambda} \int_0^\Lambda T \exp(i2\pi m x / \Lambda) dx \quad (19)$$

式中: Λ 为光栅周期; T 为光栅的透过率矩阵。

通常将液晶偏振光栅 m 级次光束能量与各级衍射光束能量之和的比值作为光栅 m 级次的衍射效率,而第 m 级次光束能量的大小与 $|D_m|^2$ 成正比,因此,液晶偏振光栅第 m 级的衍射效率可以表示为^[23]:

$$\eta_m = \frac{|D_m|^2}{\sum_{m=-\infty}^{\infty} |D_m|^2} \quad (20)$$

式中: η_m 为 m 级衍射效率。通过对上式求解可得,对于 $m > 1$ 的级次,其矢量傅里叶系数均为零,所以液晶偏振光栅衍射级次分布在: 0 级和 ± 1 级。而在实验中,衍射级次的实际分布,取决于入射光的偏振态;衍射强度大小,则取决于光栅的透过率。垂直入射时,右旋圆偏光通过液晶偏振光栅会被衍射到 +1 级,左旋圆偏光则会被衍射到 -1 级,理论上衍射效率可达 100%。

斜入射时,液晶偏振光栅透过率会发生变化,从而导致 ± 1 级衍射效率也会随之改变。基于上述理论推导,结合公式 (2)、(16)、(17) 即可建立斜入射角度、驱动电压与衍射效率模型:

$$\eta_m = \frac{\left| \int_0^\Lambda T \exp\left(\frac{i2\pi m x}{\Lambda}\right) dx \right|^2}{\sum_{m=-\infty}^{\infty} \left| T \exp\left(\frac{i2\pi m x}{\Lambda}\right) dx \right|^2} \quad (21)$$

通过该模型可以定量计算出液晶偏振光栅不同入射角度下的电压、衍射效率,进而简化标定过程,提高衍射效率。

2 斜入射下液晶偏振光栅衍射特性分析

根据上述模型,文中选择向列型混合液晶材料,分别对液晶偏振光栅的光束入射角、电压和衍射效率进行了仿真和分析。其中物理参量 $K_{11} = 11.1 \times 10^{-12} N$, $K_{22} = 7.4 \times 10^{-12} N$, $K_{33} = 17.1 \times 10^{-12} N$, 真空介电常数为 $\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12} F/m$, $\epsilon_{||} = 19.0\epsilon_0$, $\epsilon_{\perp} = 5.2\epsilon_0$, 折射率为 $n_o = 1.521$, $n_e = 1.746$, 液晶相控阵厚度 $d = 5 \times 10^{-6} m$, 激光波长为 $\lambda = 1064 \times 10^{-6} m$ 。

为了分析斜入射下液晶偏振光栅的衍射特性,对光束入射角从 $-10^\circ \sim +10^\circ$, 电压从 0~20 V 的情况进行仿真,结果如图 5 所示。

图 5 为液晶偏振光栅 +1 级衍射效率与斜入射角

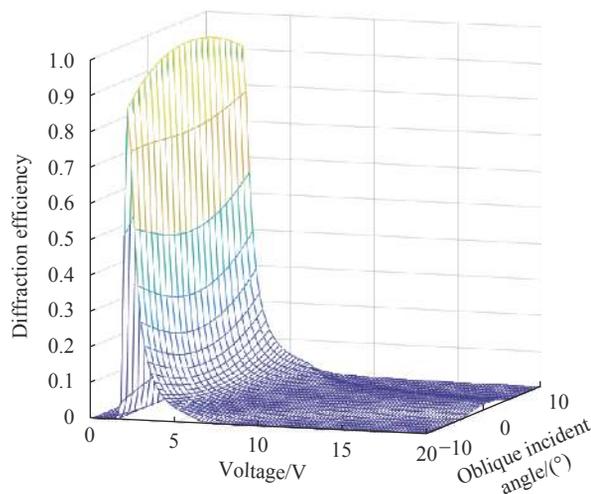


图 5 斜入射角度,电压和+1 级衍射效率关系

Fig.5 Relationship between oblique incident angle, voltage and +1 diffraction efficiency

度和电压之间的关系。通过图 5 可以看出, +1 级衍射效率受电压和斜入射角度影响。入射光束角度从 -10° 倾斜到 10° 时, 其中 0° 入射时光栅 +1 级衍射效率最高, 随着入射角度增大, +1 级衍射效率逐渐下降; 当驱动电压大于阈值电压时, +1 级衍射效率先随电压升高而升高, 衍射效率达到最大值之后, 如果电压继续升高, +1 级衍射效率逐渐下降最终降为 0, 这与液晶偏振光栅的光束偏转原理是相吻合。由此可以看出, 用液晶偏振光栅斜入射角度-驱动电压-衍射效率模型来表征光束斜入射时的传播过程是可行的, 有效的。

若光束以固定角度倾斜入射液晶偏振光栅, 便可得到在某个斜入射角度下电压和衍射效率关系, 如图 6 所示, 图 (a)~(c) 分别为正入射、斜入射 -10° 、斜入射 $+10^\circ$ 时, 电压与 +1 级光束衍射效率关系图。

液晶偏振光栅在实际使用过程中需要对其驱动电压进行标定, 传统标定方法是在光束垂直入射光栅

时, 从光栅阈值电压开始对进行调整, 直到达到最佳偏转效果才停止调整, 这种方法导致标定速度较慢。从图 6(a) 电压与衍射效率模型可以看出, 垂直入射时液晶偏振光栅光束偏转 +1 级的最优驱动电压为 2.2 V, 由于制备工艺的限制, 光栅的最优驱动电压会有所偏差, 在实际标定过程中只需在 2.2 V 附近微调电压, 即可得到光栅实际的最优驱动电压, 该模型可避免现有复杂标定过程, 有效提高标定效率。对比图 6(a)~(c), 倾斜入射时, 最优电压会在 2.2 V 附近发生小幅度的变化, 而 $+10^\circ$ 入射时, 最优偏转电压由原来的 2.2 V 变为 2.0 V; -10° 入射时, 最优偏转电压由原来的 2.2 V 变为 2.4 V。通过该模型可求出不同入射角度下驱动电压, 实现衍射效率最优时驱动电压的快速标定。

通过上述分析, 求出不同入射角度下光栅最优驱动电压, 可得到斜入射角度和衍射效率的关系, 如图 7 所示。

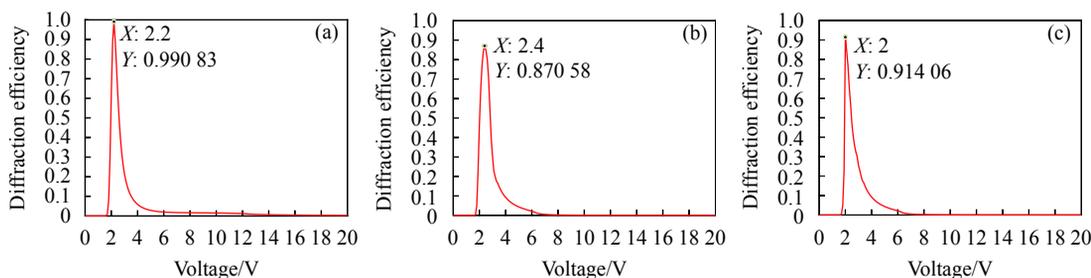


图 6 (a) 垂直入射; (b) 斜入射 -10° ; (c) 斜入射 $+10^\circ$

Fig.6 (a) Vertical incident; (b) Oblique incident -10° ; (c) Oblique incident $+10^\circ$

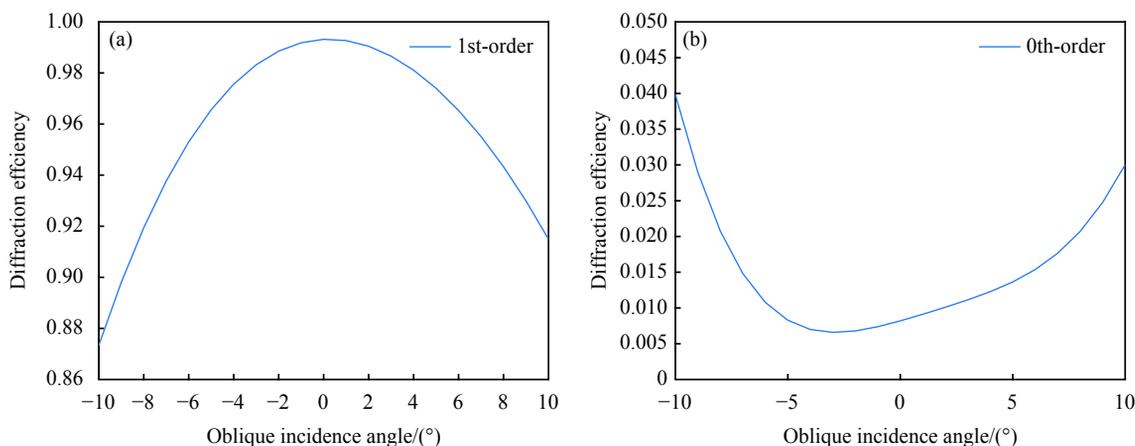


图 7 (a) +1 级衍射效率; (b) 0 级衍射效率

Fig.7 (a) +1 order diffraction efficiency; (b) 0 order diffraction efficiency

从图 7 液晶偏振光栅+1 级和 0 级衍射效率的变化趋势可以明显看出,当光束垂直入射时,一级衍射效率较高,但随着入射角度增加,一级衍射效率逐渐

降低,零级衍射效率逐渐上升,光束能量发生泄露。通过上述模型可定量计算出驱动电压、斜入射角度、衍射效率的关系,如表 1 和表 2 所示。

表 1 光束 0°~10°入射时驱动电压、衍射效率之间对应关系

Tab.1 Corresponding relationship between driving voltage and diffraction efficiency when the beam is incident at 0°-10°

Oblique incidence angle/(°)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Driving voltage/V	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.1	2.1	2.1	2.0	2.0
Diffraction efficiency	99.3%	99.1%	98.9%	98.5%	98.1%	97.4%	96.5%	95.5%	94.3%	92.9%	91.4%

表 2 光束-10°~0°入射时驱动电压、衍射效率之间对应关系

Tab.2 Corresponding relationship between driving voltage and diffraction efficiency when the beam is incident at -10°-0°

Oblique incidence angle/(°)	0	-1	-2	-3	-4	-5	-6	-7	-8	-9	-10
Driving voltage/V	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.3	2.3	2.3	2.3	2.4	2.4
Diffraction efficiency	99.3%	99.1%	98.8%	98.3%	97.5%	96.5%	95.3%	93.7%	91.9%	89.8%	87.1%

通过以上分析可得,当斜入射角度达到-10°时,驱动电压变为 2.4 V,一级衍射效率为 87%,此时衍射效率下降了 12% 左右,随着斜入射角度增加,光束衍射效率逐渐下降,光束会被衍射其他级次,因此在实际使用过程中要尽量避免斜入射。

3 实验验证

针对上述仿真分析,搭建实验平台对其进行验证,实验装置如图 8 所示,实验系统主要包括:激光器、1/4 波片,偏转角为 5°液晶偏振光栅、观察屏和 CCD 相机等部分。实验中激光器产生 1064 nm 的激光,出射光经过准直扩束镜,入射到 QWP 上,使用 QWP 将线偏光转化为圆偏光,然后经过液晶偏振光栅发生光束偏转,照射到观察屏上,最后利用 PC 控制驱动器产生驱动电压,施加给液晶偏振光栅。改变入射光束角度,同时用 CCD 相机记录零级、正一级光强分布随入射角度的变化,通过对采集的光斑进行处理即可得到斜入射角度对衍射效率的影响。

利用 CCD 相机采集的几组斜入射下光束分布图案如图 9 所示。图 (a) 中的光斑为+1 级光斑,在图 (b) 和图 (c) 亮的光斑为+1 级光斑,暗的光斑为 0 级光斑。由于液晶偏振光栅偏转角度为 5°,因此当光束垂

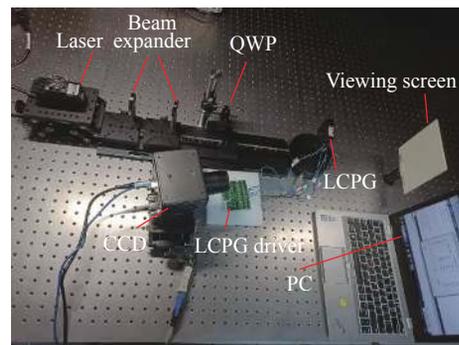


图 8 实验装置图

Fig.8 Schematic diagram of the experimental device

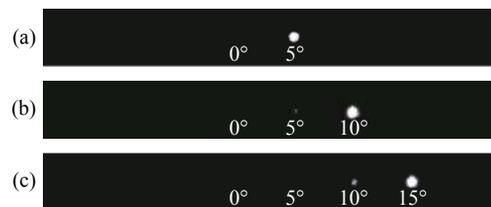


图 9 (a) 垂直入射下+1 级光斑图; (b) 5°入射下+1 级光斑图; (c) 10°入射下+1 级光斑图

Fig.9 (a) Light spot pattern of +1 under vertical incidence; (b) Light spot pattern of +1 at 5° incidence; (c) Light spot pattern of +1 at 10° incidence

直入射时,+1 级光斑偏转角度为 5°,5°和 10°入射

时, +1 级光斑分别会偏转到 10°和 15°位置, 如图 (b) 和 (c) 所示。

从图 9 可以看出, 对比垂直入射的光强分布, 当光束以 5°、10°入射时, 0 级光斑则明显增强。10°入射时, 光栅衍射效率低于 5°和垂直入射。根据公式 (18) 衍射效率计算公式, 可得到不同斜入射角度下的衍射效率, 如图 10 所示。

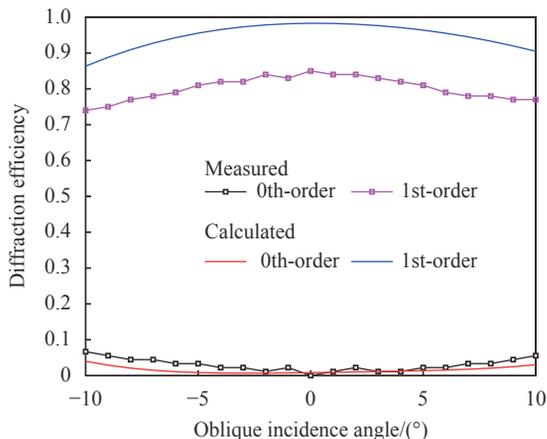


图 10 实验验证

Fig.10 Experimental verification

由于液晶偏振光栅形貌缺陷、液晶盒厚度误差、菲涅耳损耗等因素的影响, 液晶偏振光栅实际衍射效率低于理论值, 但根据测量所得衍射效率的变化趋势可以明显看出, 随着斜入射角度增大, 一级衍射效率逐渐降低, 零级衍射效率逐渐升高。光束入射角从 -10°~+10°变化时, 衍射效率出现了不对称性, 这是因为液晶偏振光栅的真实结构并不是完全对称。当光束入射角度为 0°~10°入射时, 一级光束能量损失了 10%, 零级光束能量上升了 6%; 而当光束入射角度从 -10°~0°变化时, 一级光束能量损失了 13%, 零级光束能量上升了 8%。通过实验结果可以看出, 仿真结果和实验结果基本吻合。

4 结 论

文中从液晶偏振光栅的结构出发, 推导建立了液晶偏振光栅斜入射角度-驱动电压-衍射效率的三维模型。通过求解液晶分子指向矢分布, 得到了倾斜角和电压之间的关系, 将扩展琼斯矩阵和矢量衍射理论相结合, 表征了斜入射时液晶偏振光栅第 m 级的衍射特性, 并对光束入射角度为 -10°~+10°的情况进行了仿

真和实验验证。仿真和实验结果表明, 斜入射会使光束偏转的最优电压发生变化, 衍射效率随入射角度的增大而减小, 入射角过大时, 会明显出现其他衍射级。光束正入射时, 最优驱动电压为 2.2 V, 10°入射时, 最优驱动电压变为 2.0 V, -10°入射时, 最优驱动电压变为 2.4 V; 且光束入射角从 -10°倾斜到 -10°时, 衍射效率最大下降了 13%。因此, 在实际应用环境中需对入射光束的角度进行控制, 该研究为提高液晶偏振光栅的衍射效率提供了技术指导。

参考文献:

- [1] Hoy C, Stockley J, Shane J, et al. Non-mechanical beam steering with polarization gratings: A review [J]. *Crystals*, 2021, 11(4): 361.
- [2] Wang Lina, Li Mingqiu, Wang Chunyang. Diffraction characteristics of cascaded liquid crystal polarizing gratings [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(3): 88-92. (in Chinese)
- [3] Kim J, Miskiewicz M N, Serati S, et al. Nonmechanical laser beam steering based on polymer polarization gratings: Design optimization and demonstration [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2015, 33(10): 2068-2077.
- [4] Kim J, Miskiewicz M N, Serati S, et al. Demonstration of large angle nonmechanical laser beam steering based on LC polymer polarization gratings[C]//Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering, 2011, 8052: 8052T.
- [5] Escuti M J, Jones W M. 39.4: Polarization - independent switching with high contrast from a liquid crystal polarization grating [J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2006, 37(1): 1443-1446.
- [6] Zhang Tianyi, Wang Xiangru, Hang Zhiqiang. Application of liquid crystal optical phase technology in satellite multiple access communication [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 44(11): 1122004. (in Chinese)
- [7] Zhang Dai, Hao S, Zhao Q, et al. Wavefront reconstruction method based on wavelet fractal interpolation for coherent free space optical communication [J]. *Optics Communications*, 2018, 410: 723-729.
- [8] Xiao Feng. Research on key technology of liquid crystal optical phased array[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2018. (in Chinese)
- [9] Zhao Zhiwei. Study on polarization grating of liquid crystal with large deviation angle[D]. Changchun: Changchun Institute of

- Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2020. (in Chinese)
- [10] Serati S, Hoy C L, Hosting L, et al. Large-aperture, wide-angle nonmechanical beam steering using polarization gratings [J]. *Optical Engineering*, 2017, 56(3): 031211.
- [11] Li Songzhen. Design of liquid crystal polarization grating and its optical deflection characteristics[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2019. (in Chinese)
- [12] Tan L, Ho J Y. P. 92: Characterization of complex liquid crystal polarization gratings at oblique incidence using extended Jones matrix method [J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2013, 44(1): 1335-1337.
- [13] Xiangjie Z, Jiazhu D, Dayong Z, et al. Oblique incidence effect on steering efficiency of liquid crystal polarization gratings used for optical phased array beam steering amplification [J]. *Optical Review*, 2016, 23(5): 1-10.
- [14] Liu Chunjie. The study on the fabrication of active liquid crystal polarization grating[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2018. (in Chinese)
- [15] Li Jiyang, Tan Yidong, Wu Ji, et al. Birefringence measurement of liquid crystals based on laser feedback effect [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(3): 0306003. (in Chinese)
- [16] Niu Qifeng, Wang Chunyang, Zhang Guangping, et al. Solution of liquid crystal phased array director and its beam deflection [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2018, 26(12): 27-34. (in Chinese)
- [17] Panezai S, Wang D, Zhao J, et al. Study of oblique incidence characterization of parallel aligned liquid crystal on silicon [J]. *Optical Engineering*, 2015, 54(3): 037109.
- [18] Yeh P. Extended Jones matrix method [J]. *J Opt Soc Am*, 1982, 72: 507-513.
- [19] Gu C, Yeh P. Extended Jones matrix method II [J]. *J Opt Soc Am*, 1993, 10: 966-973.
- [20] Yu F H, Kwok H S. Comparison of extended Jones matrices for twisted nematic liquid crystal displays at oblique angles of incidence [J]. *J Opt Soc Am*, 1999, 16: 2772-2780.
- [21] Tan L, Ho J Y, Kwok H S. Extended Jones matrix method for oblique incidence study of polarization gratings [J]. *Applied Physics Letters*, 2012, 101(5): 324-490.
- [22] Niu Qifeng, Wang C, Shi H. Phase modulation characteristics analysis of liquid crystal spatial light modulator under oblique incidence [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2019, 90(5): 055001.
- [23] Niu Qifeng. Research on the key technology of liquid crystal phased array beam deflection[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2020. (in Chinese)