



基于随机位相分布的液晶退偏器件设计与分析*

张雨琪, 汪玉琴, 陈丹, 张蓉竹

(四川大学 电子信息学院, 成都 610065)

摘要: 为了实现对不同偏振态入射激光的退偏控制, 设计了一种具有随机位相分布结构的液晶退偏器。针对胆甾相液晶器件, 利用时域有限差分法, 对激光通过胆甾相液晶器件的传输问题建立了模型, 并通过实验验证了理论模型, 分析了激光通过液晶阵列单元后的偏振态变化及偏振态分布特性。仿真分析结果表明, 在合适的液晶材料条件和微刻蚀坑的最大厚度条件下, 胆甾相液晶器件对于不同偏振角的入射线偏振光均可以实现较好的退偏效果, 且适用的谱宽范围较大。

关键词: 液晶退偏器; 随机位相差; 胆甾相液晶; 偏振度

中图分类号: O436

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202335.230180

Design and analysis of the liquid crystal depolarizer based on random phase distribution

Zhang Yuqi, Wang Yuqin, Chen Dan, Zhang Rongzhu

(College of Electronics and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: To control the depolarization of incident laser with different polarization states, a liquid crystal depolarizer with random phase distribution structure is designed. For cholesteric liquid crystal device, a model of laser transmission through cholesteric liquid crystal device is established by using finite-difference time-domain method. The theoretical model is verified by experiments, and the polarization change and polarization distribution characteristics of laser through the liquid crystal array unit are analyzed. The simulation results show that the cholesteric liquid crystal device can achieve good depolarization effect for the linear polarized light with different polarization angles under the conditions of suitable liquid crystal material and maximum thickness of the micro-etching pit, and the applicable spectrum is wide.

Key words: liquid crystal depolarizer, random phase difference, cholesteric liquid crystal, degree of polarization

目前光电探测技术已成为获取各种信息的一种重要手段, 在红外遥感、天文观测、医疗检测等领域都得到了广泛应用^[1-4]。由于大部分光电探测器都具有偏振敏感性^[5], 为了得到高精度的探测结果, 往往需要在探测光路中放置光学退偏器来消除光束偏振态对精密探测的影响。传统的退偏器如 Løyt 型、楔形石英退偏器、基于空间可变亚波长结构光栅的退偏器^[6]、晶体光轴扇形分布的多元楔形退偏器^[7]等只能对复色光或者窄谱光束进行退偏, 且基于楔形结构的退偏器退偏效果受到晶体厚度^[8]和楔形角度的限制^[9]。

随着液晶技术的发展, 利用液晶的双折射特性实现退偏成为光学退偏器设计的一个新的途径。2007 年, Zhang Dayong 等人利用胆甾相液晶制成了楔形液晶退偏器, 实验证明了这种厚度连续变化的胆甾相液晶结构可以实现对入射线偏振光的空间匀化效果, 同时这种结构的退偏器加工工艺简单, 具有对宽谱光束的退偏能力^[10]。这种退偏器的不足在于楔形液晶结构限制了器件口径, 且光束通过楔形结构后会发生小角度的偏转, 不利于在精密光路中的应用。2016 年, Wei Bingyan 等人利用光控取向技术将曝光区域网格化, 控制曝光偏振方向按 10°间隔从 0 增

* 收稿日期: 2023-06-15; 修订日期: 2023-10-14

基金项目: 四川大学“国家级大学生创新创业训练计划”基金项目

联系方式: 张雨琪, yuqizhang@stu.scu.edu.cn。

通信作者: 张蓉竹, zhang_rz@scu.edu.cn。

加到 170° , 实现了光轴随机分布, 同时结合向列相液晶的参数, 优化了液晶盒厚使得液晶退偏器满足半波条件, 达到较好的退偏效果^[11]。这种退偏器的不足在于器件加工工艺较为复杂, 同时退偏效果与波长具有明确对应关系, 如果要对不同波长的退偏, 需要通过施加电压满足相位调制条件。

针对现有液晶退偏器存在的不足, 本文结合以上两种退偏器特点, 提出了一种随机位相分布型胆甾相液晶退偏器件, 这种基于微阵列结构的新型液晶退偏器件, 可以在较宽光谱范围内对不同偏振角的入射光实现光学退偏。

1 器件结构设计

随机位相分布型胆甾相液晶器件属于被动型光学退偏器, 这种液晶器件的结构如图 1(a) 和图 1(b) 所示, 在光学玻璃基板上利用微刻蚀技术形成厚度随机分布的微刻蚀坑阵列, 在微刻蚀坑里灌注液晶, 最后在上面覆盖一层水平摩擦取向的光学玻璃基板。刻蚀坑的厚度满足均匀随机分布特征, 因此对应每一个液晶单元(像素)所引入的位相延迟量也为均匀随机分布。其中图 1(a) 为器件侧视图, 图 1(b) 为器件随机相位分布图。灌注液晶类型选择胆甾相, 胆甾相液晶分子(CLC)的取向特征如图 1(c) 所示。

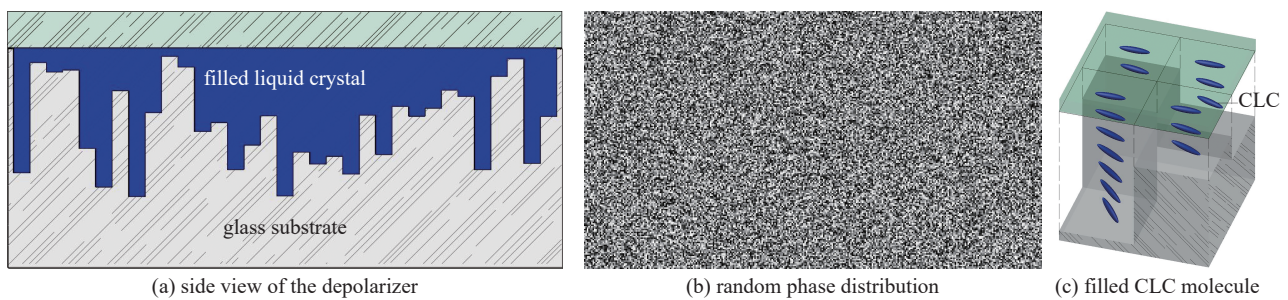


Fig. 1 Principle diagram of the liquid crystal depolarizer

图 1 液晶退偏器件基本结构

当入射激光通过这种结构的液晶器件时, 辐照范围内的每个像素均会对光束进行对应空间调制。由于像素本身的随机分布特性, 对整个光束而言则引入了一个随机分布的相位延迟量, 并且随机调制了入射光 e 光分量和 o 光分量。与此同时, 光场的偏振特性与其传输光程相关, 因此每个像素均对光场的偏振态进行了随机调制。在出射端由于微光束的叠加作用, 平均积分效果达到空间匀化, 从而实现入射偏振光的退偏。

2 理论模型

要具体分析光场在液晶中的传输特性和最终光场偏振特性的变化, 采用时域有限差分法(FDTD)进行计算。时域有限差分法是一种基于特定的边界条件严格求解麦克斯韦方程组的方法, 精确度较高, 被广泛应用于液晶器件光学特性的仿真研究中^[12]。

FDTD 方法采用 Yee 元胞, 在空间上使得 \mathbf{E} 和 \mathbf{H} 交错排列在空间不同位置。由麦克斯韦方程, 电场和磁场的旋度方程可以表示为^[13]

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\mu \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} \quad (1)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \varepsilon \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} + \sigma \mathbf{E} \quad (2)$$

利用时域有限差分方法, 设初始条件为 $\mathbf{H}^0 = 0$, 根据式(1)和式(2), 对于已知传输介质, 在源的激励下, 依次迭代前一时刻的电场和磁场, 由 \mathbf{H}^0 得到 $\mathbf{E}^{1/2}$, 由 $\mathbf{E}^{1/2}$ 得到 \mathbf{H}^1 , 由 \mathbf{H}^1 得到 $\mathbf{E}^{3/2}$, 从而由前一时刻的电场、磁场值可以得到相距二分之一时间步长的下一时刻的磁场、电场值, 这样以蛙跳形式逐步求解电磁场。具体表达式为

$$\mathbf{E}^{n+1/2} = \mathbf{E}^{n-1/2} + \frac{\Delta t}{\varepsilon} \nabla \times \mathbf{H}^n \quad (3)$$

$$\mathbf{H}^{n+1/2} = \mathbf{H}^{n-1/2} - \frac{\Delta t}{\mu} \nabla \times \mathbf{E}^n \quad (4)$$

由此可以得到整个模拟区域内近似连续的时域电场信息^[14]。

光束偏振态常用斯托克斯矢量 \mathbf{S} 来表示, 斯托克斯矢量 \mathbf{S} 为^[15]

$$\mathbf{S} = [I \quad Q \quad U \quad V]^T \quad (5)$$

式中: I 正比于入射激光光强, Q 表征激光在 x 和 y 方向上的偏振情况, U 表征激光在 $+45^\circ$ 和 -45° 方向上的偏振情况, V 表征激光的右旋和左旋特性, T 为矩阵的转置符号。由式(1)~(4)利用 FDTD 方法可以得到经过随机位相分布型液晶器件传输后出射激光的微光束琼斯分量 E_x 、 E_y , 而斯托克斯矢量 \mathbf{S} 可以由所得琼斯矢量 \mathbf{E} 表示为^[16]

$$\mathbf{S} = [E_x E_x^* + E_y E_y^* \quad E_x E_x^* - E_y E_y^* \quad E_x E_y^* + E_y E_x^* \quad i(E_x E_y^* - E_y E_x^*)]^T \quad (6)$$

式中: $*$ 为复数的共轭符号。

对于出射端微光束的叠加态^[17-18], 有

$$Q = \frac{1}{A} \sum_{i=1}^N a_i Q_i \quad (7)$$

$$U = \frac{1}{A} \sum_{i=1}^N a_i U_i \quad (8)$$

$$V = \frac{1}{A} \sum_{i=1}^N a_i V_i \quad (9)$$

式中: A 是激光光斑的面积, a_i 是第 i 个像素的面积, N 为激光光斑内的像素数, Q_i 、 U_i 、 V_i 分别表示对应每一像素出射微光束的斯托克斯分量。需要指出的是, 上述出射激光偏振态的计算方法, 没有考虑衍射效应。根据 Wei Bingyan 和 Michinori Honma 等人的研究成果^[11,18], 上述计算公式虽然没有考虑衍射效应, 但通过实验验证, 测试所得的偏振态基本与上述计算公式获得的偏振态一致, 证明了采用上述公式计算偏振态的有效性。同时也需要指出, 采用微米级阵列像素的液晶空间光调制器件对入射激光进行调制, 会引入一定衍射损耗和散射损耗, 这种光能量的损耗对相关应用的影响基本可以忽略^[19]。

光束的偏振特性用偏振度 (degree of polarization, DOP) 定量表述为^[20]

$$D_p = \frac{\sqrt{Q^2 + U^2 + V^2}}{I} \times 100\% \quad (10)$$

利用式(1)~(10), 可以分析得到液晶器件出射激光束的偏振度, 进而可以分析器件的退偏能力。

3 数值分析模型与验证

3.1 数值分析模型

设置光传输方向为 z 轴, 在与 z 轴垂直的平面上取两正交方向分别为 x 、 y 轴。设 θ 为液晶分子长轴与 x 轴的初始夹角。将胆甾相液晶的分子长轴方向 l 的分量分别设置为 $l_x = \cos(zw + \theta)$, $l_y = \sin(zw + \theta)$, $l_z = 0$, 其中, $w = 2\pi/H$, H 为胆甾相液晶螺距。

随机位相分布型液晶器件的参数设定为: 液晶材料选择了一种经过设计的混晶液晶材料, 其 e 光折射率和 o 光折射率可根据需要进行混晶调制, 双折射率差调制范围可以经过混晶进行调制, 实现 $0.1 \sim 0.5$ 范围内的双折射率范围; 刻蚀坑深度在 $2 \sim 38 \mu\text{m}$ 之间随机均匀变化; 液晶器件的像素大小设定为 $60 \mu\text{m} \times 60 \mu\text{m}$ 。首先利用 FDTD 方法得到线偏振光束通过最大工作距离为 $38 \mu\text{m}$ 的液晶层时随传输距离改变而变化的电场分量 E_x 、 E_y 的对应数值, 为同时兼顾计算速度与精度, 设置网格尺寸为 $\Delta x = \Delta y = \Delta z = \lambda/18$, 最大的仿真时间是模拟网格基于 Courant 稳定性准则计算的, 使用 99% 的理论最大仿真时长。在处理边界条件时, 在 x 、 y 方向上采用周期性边界条件, 为吸收反射光波, 在 z 方向上采用完美匹配层。假设入射光束直径为 1.7 mm , 则通过的像素大约为 256 个, 利用上节所述公式(1)~(6)可以得到每一出射微光束的斯托克斯矢量, 再利用上节所述公式(7)~(10)可以得到出射光束的偏振度。

3.2 基于空间光调制器的实验验证分析

为验证数值分析模型的准确性, 利用硅基液晶空间光调制器 (LCoS) 进行实验验证。验证过程中利用上述数值分析模型, 分析了在液晶退偏器微刻蚀坑内灌注向列相液晶时, 器件对入射光场的调控效果。对比数值分析结果和空间光调制器相位调制作用效果确认模型的有效性。空间光调制器通过改变施加在各像素上的电压进行相位差的调制, 可以模拟不同厚度的向列相液晶调制器调制效果。向这种结构的器件灌注向列相液晶时, 退偏器的

理论模型与胆甾型相同,对于数值分析模型,由于向列相液晶分子空间排列情况与胆甾相不同,因此在进行FDTD理论仿真模拟时,为贴合实验所用空间光调制器的液晶调制特点,在每一空间网格内,设置向列相液晶的分子长轴方向相同,且位于 x - y 平面内,随机位相分布型液晶器件的参数设定与3.1节完全一致。

改变液晶分子长轴与光束偏振方向的夹角 α 分别为 0° 、 15° 、 30° 、 45° 、 75° 、 90° ,仿真计算了波长为 635 nm 的线偏振光经向列型液晶器件传输后,出射激光束的偏振度。对于向列型液晶器件来说,出射光斯托克斯矢量的 Q 分量仅与偏振角有关,斯托克斯矢量的 U 分量和 V 分量与偏振角和相位差均相关。对于固定偏振角的入射线偏振光来说, Q 分量几乎为一定值。偏振度理论计算结果如图2(a)蓝色虚线所示,只有当 α 角为 45° 时,可以实现较好的退偏效果,液晶器件具有入射偏振角选择性。

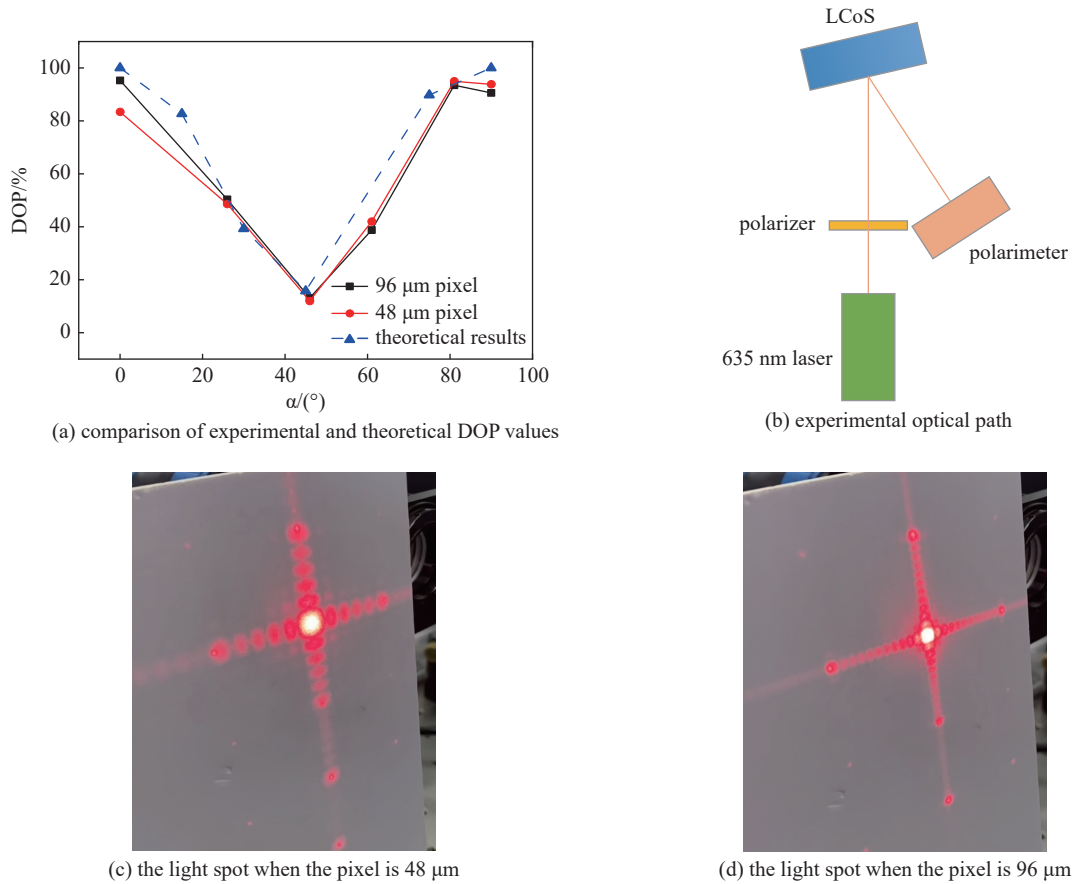


Fig. 2 Experimental results

图 2 实验验证

实验验证光路如下图2(b)所示,采用波长为 635 nm 、直径为 3.5 mm 的激光入射到LCoS器件并反射,利用偏振态测试仪测试出射光偏振态。选用的LCoS型号为西安中科微星FSLM-2K70-P02,分辨率为 1920×1080 ,单个像素尺寸为 $8\ \mu\text{m}$ 。通过控制随机相位分布单元所占用的像素数量,可以控制随机相位单元的尺寸分别为 $48\ \mu\text{m}$ 和 $96\ \mu\text{m}$ 。控制入射激光偏振方向与液晶长轴的夹角 α 分别为 0° 、 15° 、 30° 、 45° 、 75° 和 90° 。当随机相位单元为 $48\ \mu\text{m}$ 和 $96\ \mu\text{m}$ 时,由白屏接收的光斑分别如图2(c)、(d)所示,可见微小像元阵列结构使得光束产生散射、衍射现象,且图中的衍射光斑损耗和散射光斑损耗主要来源于入射光的 e 光分量,进行数据处理时对这部分的 e 光损耗进行了等效处理。为避免散射和衍射光对退偏产生干扰,只针对零级处中心亮光斑对应光束进行偏振态分析。所得理论计算结果和实验验证结果如图2(a)所示,随着光束初始偏振角的增加,出射激光的偏振度变化规律与本文理论计算结果所得规律变化基本一致,即随着初始偏振角的增加,偏振度先减小再增加,当 α 为 45° 左右时,出射激光具有最小的偏振度,实现了比较明显的退偏效果。

4 设计结果与分析

按照3.1小节所设置的胆甾相液晶退偏器仿真参数,设置双折射率差值 $\Delta n = n_e - n_o = 0.5$,液晶螺距 H 为 $40\ \mu\text{m}$,刻蚀坑最大厚度 D 为 $38\ \mu\text{m}$,波长变化范围是 $450\sim 1250\text{ nm}$,为简化运算忽略材料的色散效应。计算分析了基于

上述条件的胆甾相液晶退偏器对于具有不同偏振角的入射光的退偏效果, 计算结果如图 3(a) 所示。由计算结果可见, 胆甾相液晶退偏器可以对 450 nm 到 1 250 nm 波段范围内的入射光实现退偏, 最大偏振度小于 18%。设置 $\Delta n=0.3$, 计算结果如图 3(b) 所示。随着 Δn 的减小, 偏振度呈上升趋势, 退偏效果减弱。改变液晶螺距为 60 μm , 刻蚀坑最大厚度为 60 μm , 设置 $\Delta n=0.225$, 计算结果如图 3(c) 所示。当刻蚀坑最大厚度增大, 且满足螺距与刻蚀坑最大厚度相近的条件时, 偏振度下降, 退偏效果增强。对于具有微米或纳米级微阵列结构的器件, 受到边缘场效应的制约, 厚度需要严格控制, 同时厚度会显著的影响液晶排列效果, 从而对其相位调制造成影响, 因此器件刻蚀坑最大厚度不宜过大。

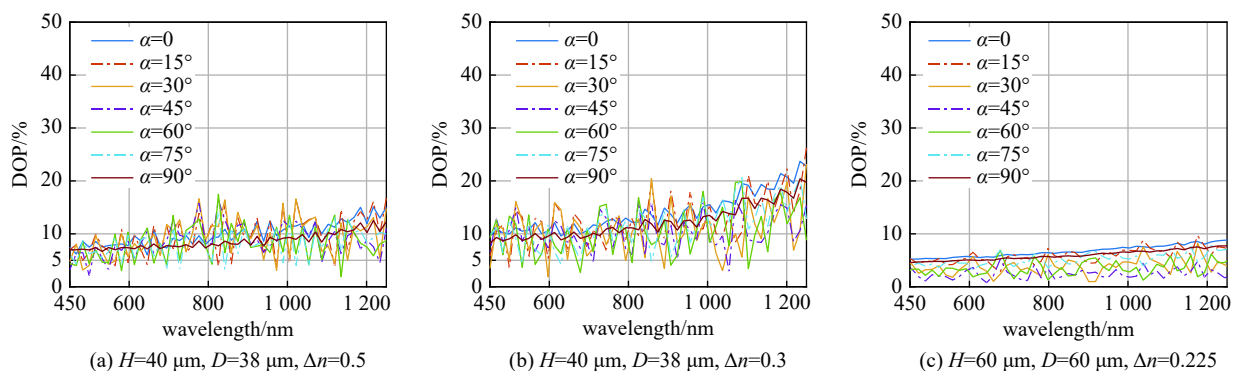
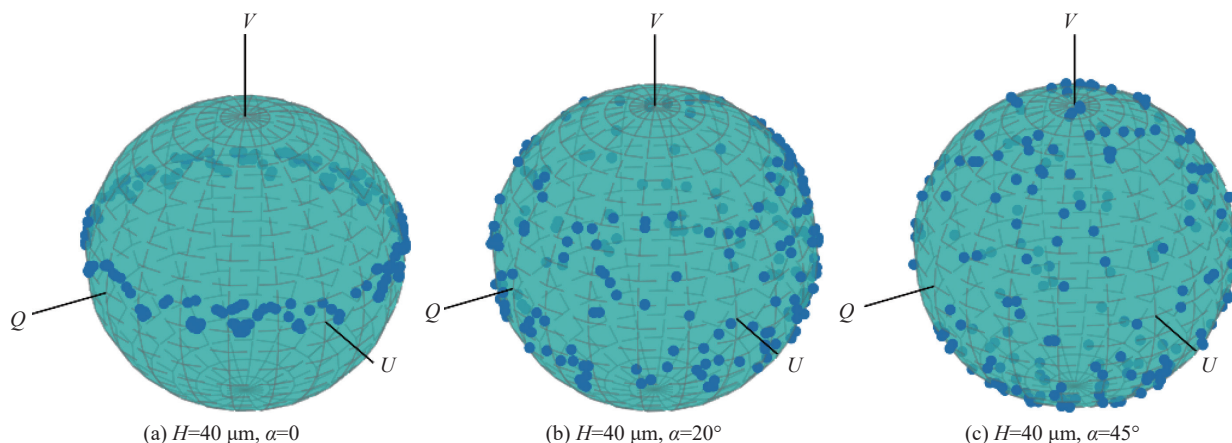


Fig. 3 DOP results at different wavelength

图 3 不同波长的 DOP 结果

螺距的改变将影响出射激光束的偏振态分布情况。为了更加直观反映出射激光的偏振态, 可以将偏振态的信息映射到极坐标系进行表示, 这种表示方法为邦加球表示法。邦加球球面上的一点代表一个偏振态, 所有微光束对应点在邦加球上分布越均匀或者相对原点具有对称分布特性, 则空间匀化效果越好。而邦加球上每一微光束对应的点的位置可以由斯托克斯矢量确定, 在将斯托克斯矢量第一项进行归一化后, Q 、 U 、 V 分别对应于每一点的三维直角坐标系坐标数值。当螺距 H 为 40 μm , 最大刻蚀坑厚度为 38 μm 时, 波长为 1 064 nm 的激光经胆甾型液晶器件传输后, 出射激光束的偏振态在邦加球上的分布如图 4 所示。其中, 图 4(a) 对应 α 为 0, 图 4(b) 对应 α 为 20°, 图 4(c) 对应 α 为 45°。由仿真结果可以看出, 对应不同的入射偏振角, 当 α 接近 0 时, 所有微光束的 V 分量接近于 0, 出射微光束线偏振特征明显, 且出射微光束在 Q - U 平面对称均匀分布, 具有较好的退偏特性; 当 α 接近 20° 时, 出射微光束的偏振出现椭圆偏特征, V 值不再接近于 0, 且微光束的分布从 Q - U 平面内向邦加球其他位置对称均匀扩展, 具有较好的退偏特征; 当 α 接近 45° 时, 出射激光束的偏振态在邦加球上的空间均匀分布效果同样较好。当螺距 H 为 2 μm 时, α 为 0、20°、45° 的激光对应的出射激光束的偏振态在邦加球上的分布情况分别如图 4(d)、(e)、(f) 所示, 可以看出当 α 接近 0° 时, 出射微光束的偏振态主要集中在邦加球的上半球区域, 对称性被破坏, 退偏效果较差; 当 α 增加接近 45° 时, 出射激光束的偏振态在邦加球上扩展, 退偏效果获得改善。随着螺距减小, 出射激光束的偏振态在邦加球上呈现出更不均匀、非对称的空间分布。因此当使用小螺距时, 随机位相分布特性在较大程度上被破坏, 这种非对称的不均匀性导致小螺距时退偏效果变差, 因此在后续设计中主要考虑与液晶厚度对应的螺



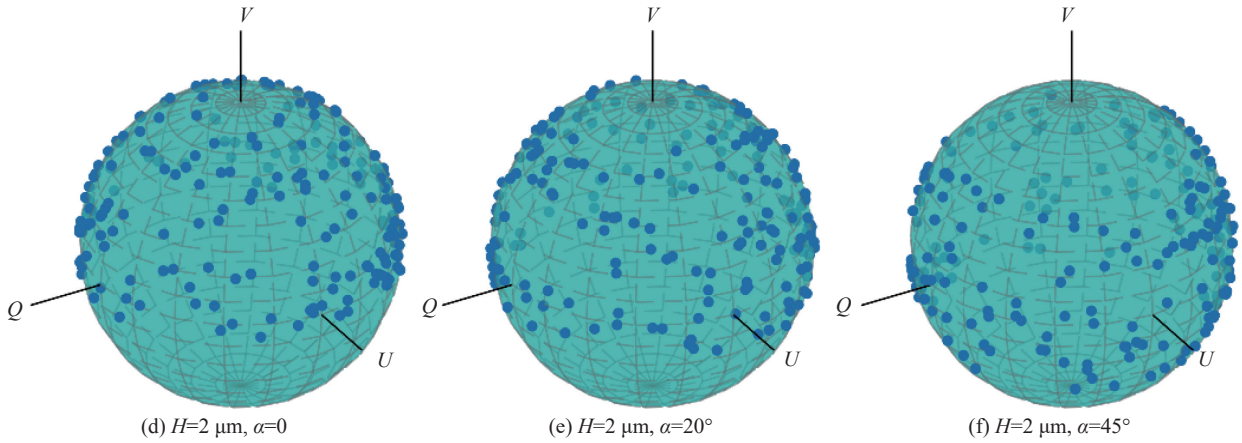


Fig. 4 Polarization distribution of emergent light passing through the depolarizer

图 4 出射光偏振态的分布

距进行设计。

保持刻蚀坑最大厚度为 $38\ \mu\text{m}$ 不变, 偏振角为 0 , 改变螺距 H 分别为 20 、 30 、 36 、 38 、 40 、 45 、 $50\ \mu\text{m}$, 仿真得到偏振光谱图如图 5(a) 所示。可见当 α 接近 0 时, 螺距对于退偏效果影响较大, 当螺距与刻蚀坑最大厚度相近时退偏效果较好。综合前述邦加球的分析, 当最大刻蚀坑厚度与螺距匹配时, 出射微光束在邦加球上具有最优化的对称性与均匀性, 保证了随机位相分布特性对出射微光束的调制效果, 实现了较好的退偏特性。 α 为 45° 时, 改变螺距值, 仿真所得偏振光谱图如图 5(b) 所示, 螺距的改变对于退偏效果影响较小, 这与前述分析的偏振角为 45° 时具有较优的退偏特性, 且退偏特性受螺距改变影响不大的规律是吻合的。

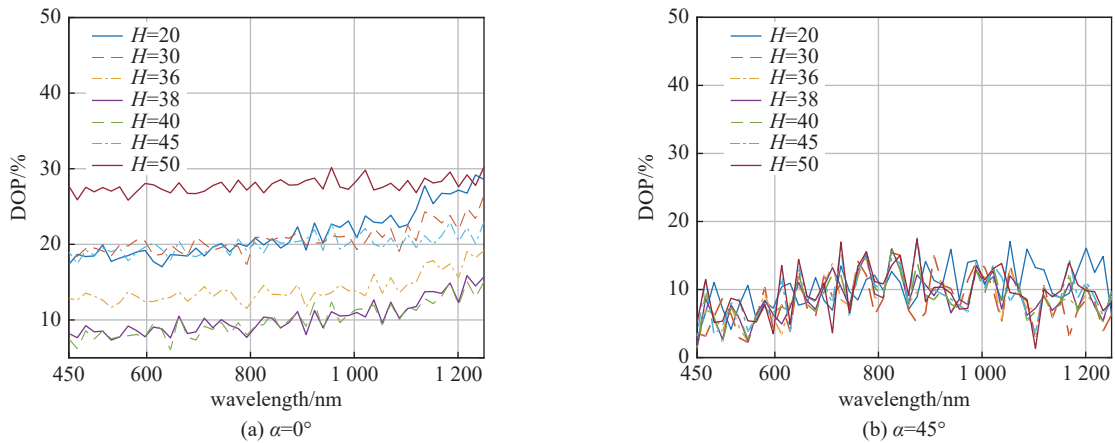


Fig. 5 DOP results at different wavelength

图 5 不同波长的 DOP 结果

综上, 对基于随机相位分布结构的胆甾相宽波段退偏器件进行了优化设计。综合考虑了材料、刻蚀坑厚度、螺距等因素对偏振度的影响, 在进行优化后, 将折射率差值设置为 0.4 , 刻蚀坑最大厚度为 $38\ \mu\text{m}$, 像素大小为 $60\ \mu\text{m}\times 60\ \mu\text{m}$, 螺距为 $40\ \mu\text{m}$ 。得到最终优化器件的偏振度光谱图如图 6 所示。定义各个偏振角对应出射偏振度的平均值为平均偏振度, 则该器件可在 $450\sim 1250\ \text{nm}$ 的宽光谱范围内实现平均偏振度约小于 15% 的退偏效果。

5 结 论

基于随机位相分布结构胆甾相液晶器件可以实现对入射激光的空间退偏效果。模拟计算结果表明: 器件的退偏效

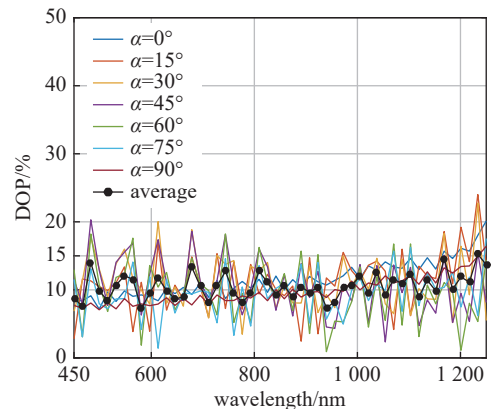


Fig. 6 Optimization result

图 6 优化设计结果

果受到液晶螺距、液晶材料双折射率差值、入射光偏振角、刻蚀坑最大厚度等因素影响。通过优化液晶双折射率、刻蚀坑厚度、螺距等器件参数,设计出的胆甾相液晶退偏器能够在较宽光谱范围内(450~1250 nm)实现约小于15%的平均偏振度。这种新型液晶退偏器还具有加工简单、大口径等优点,在光电探测、光通信等领域具有应用前景。

参考文献:

- [1] 唐茜, 郭立新, 赵葆常. 一种用于大气超光谱探测的异型双 H-V 消偏器[J]. 光谱学与光谱分析, 2017, 37(12): 3913-3919. (Tang Qian, Guo Lixin, Zhao Baochang. An allotype double H-V depolarizer for hyperfine spectrometer[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2017, 37(12): 3913-3919)
- [2] Guo Peiyun, Sun Dongpeng, Zhu Jiliang. Depolarization effect on the electro-optical properties of polymer-stabilized sphere phase liquid crystal[J]. *Liquid Crystals*, 2020, 47(3): 433-437.
- [3] 武志昆, 石恩涛, 王咏梅, 等. 光谱仪会聚光路中退偏器的设计方法[J]. 光学学报, 2022, 42: 1012001. (Wu Zhikun, Shi Entao, Wang Yongmei, et al. Design method of depolarizer in converging optical path of spectrometer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42: 1012001)
- [4] Shen Paisheng, Palais J C, Lin C. Tunable singlemode fibre depolariser[J]. *Electronics Letters*, 1997, 33(12): 1077-1078.
- [5] 王建军, 林宏旻, 隋展, 等. 一种新型液晶退偏振器的研究[J]. 激光技术, 2007, 31(3): 311-313. (Wang Jianjun, Lin Honghuan, Sui Zhan, et al. Research of a new kind of liquid crystal depolarizer[J]. *Laser Technology*, 2007, 31(3): 311-313)
- [6] Biener G, Niv A, Kleiner V, et al. Computer-generated infrared depolarizer using space-variant subwavelength dielectric gratings[J]. *Optics Letters*, 2003, 28(16): 1400-1402.
- [7] 任树锋, 吴福全. 新型晶体光轴扇形分布退偏器的研究[J]. 中国激光, 2013, 40: 0916001. (Ren Shufeng, Wu Fuquan. Study on a novel depolarizer whose optical axes are fan-shaped distribution[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013, 40: 0916001)
- [8] 葛菁华, 陈哲, 罗英达, 等. 适用于单色脉冲光的新型双光楔晶体退偏器[J]. 应用光学, 2010, 31(5): 864-870. (Ge Jinghua, Chen Zhe, Luo Yingda, et al. New double-wedge crystal depolarizer for monochromatic pulse light[J]. *Journal of Applied Optics*, 2010, 31(5): 864-870)
- [9] 宋师霞, 宋连科. 双光楔旋光退偏器的 Mueller 矩阵分析[J]. 光学学报, 2009, 29(7): 1947-1950. (Song Shixia, Song Lianke. Analysis of double plate rotation depolarizer by Mueller matrix[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(7): 1947-1950)
- [10] Zhang Dayong, Luo Fei, Luo Yongquan, et al. Cholesteric liquid crystal depolarizer[J]. *Optical Engineering*, 2007, 46: 070504.
- [11] Wei Bingyan, Chen Peng, Ge Shijun, et al. Liquid crystal depolarizer based on photoalignment technology[J]. *Photonics Research*, 2016, 4(2): 70-73.
- [12] 方运, 张健, 吴丽莹. 基于时域有限差分法的液晶光学特性模拟[J]. 光学学报, 2010, 30(2): 562-566. (Fang Yun, Zhang Jian, Wu Liying. Optical property simulation of liquid crystal based on finite-difference time-domain method[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(2): 562-566)
- [13] Kirby A K, Hands P J W, Love G D. Optical design of liquid crystal lenses: off-axis modelling[C]//Proceedings of SPIE 5874, Current Developments in Lens Design and Optical Engineering VI. 2005: 70-79.
- [14] 谭伟, 杨存, 唐吉龙, 等. 基于时域有限差分法的 Au 纳米天线增强消光特性研究[J]. 光子学报, 2018, 47: 0516006. (Tan Wei, Yang Cun, Tang Jilong, et al. Study of extinction enhancement of Au nano antenna by using finite difference time domain method[J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 47: 0516006)
- [15] Diorio N J Jr, Fisch M R, West J L. Filled liquid crystal depolarizers[J]. *Journal of Applied Physics*, 2001, 90(8): 3675-3678.
- [16] 吴东瑾, 高万荣, 常颖. 基于偏振敏感光学相干层析术的人体组织退偏特性在体测量方法[J]. 光子学报, 2021, 50: 1217002. (Wu Dongjin, Gao Wanrong, Chang Ying. In vivo measurement for depolarization characteristic of human tissue based on polarization-sensitive optical coherence tomography[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2021, 50: 1217002)
- [17] Wang Yilin, Zhu Wenqi, Zhang Cheng, et al. Ultra-compact visible light depolarizer based on dielectric metasurface[J]. *Applied Physics Letters*, 2020, 116: 051103.
- [18] Honma M, Nose T. Liquid-crystal depolarizer consisting of randomly aligned hybrid orientation domains[J]. *Applied Optics*, 2004, 43(24): 4667-4671.
- [19] Zhao Xixin. High precision optical wavefront generation using liquid crystal spatial light modulator (LC-SLM)[M]//Choudhury P K, Ibrahim A B. *Liquid Crystals*. London: IntechOpen, 2022.
- [20] Kalbarczyk A, Jaroszewicz L R, Bennis N, et al. The young interferometer as an optical system for a variable depolarizer characterization[J]. *Sensors*, 2019, 19: 3037.