

文章编号:1007-2780(XXXX)XX-0001-09

亚波长金光栅与液晶界面之间的锚定研究

胡迎, 韦穗*, 张泽林, 沈川, 屈磊

(安徽大学光电信息获取与防护技术国家重点实验室, 安徽合肥, 230039)

摘要:针对亚波长金光栅直接浸润液晶带来的取向异常、效率损失问题,面向亚波长特征尺寸的空间光调制器亟需兼具工艺简洁性与性能优势的优化锚定方案。为此,本文提出一种新的锚定方案:采用聚甲基丙烯酸甲酯(Polymethyl Methacrylate, PMMA)作为制备金光栅的光刻胶,也作为槽内填充和液晶盒上基板的锚定材料,既简化加工工艺又使取向均匀,避免了浸润问题。为揭示亚波长金光栅与液晶面直接接触时的锚定规律,明确直接浸润方案的性能局限,首先采用液晶直接锚定金光栅表面的方案,借助正交偏光显微镜实验研究了亚波长金光栅浸润在液晶中时液晶分子的取向。实验制备了与金光栅对应的下基板取向分别平行、垂直于栅线的两组液晶盒,观察到液晶分子在亚波长金光栅的样本中沿栅线取向排列,造成样本中液晶分子呈扭曲排列。这种排列不是经典的相位调制器技术优选的平行锚定模式,而且与激励光栅共振的金光栅表面等离极化激元(Surface Plasmon Polaritons, SPP)的偏振方向正交,金光栅共振无法有效地感受到液晶调制的变化而达到动态调制的目的。基于上述实验观测的界面取向特性,进一步利用 TechWiz 3D 软件模拟金光栅槽内分别填充 PMMA 和液晶时加电情况下金光栅下表面液晶指向矢的变化,给出金光栅下表面液晶有效折射率的变化值。将得到的有效折射率数据导入到 FDTD Solutions 软件,对比金光栅槽内填充 PMMA 和液晶两种方案的反射相位调制量与反射率特性。仿真结果表明,与槽内填充液晶的方案相比,PMMA 填充方案可实现更完整的 $0 \sim 2\pi$ 相位调制范围与更优异的反射率特性。本研究表明 PMMA 平坦化层是面向液晶动态调控的光学超表面器件一种可取的技术方案。

关键词:亚波长金光栅;相位调制;液晶盒锚定;液晶有效折射率;PMMA 平坦化层

中图分类号:O436 **文献标识码:**A **doi:**10.3724/CJLCD.2026-0152 **CSTR:**32172.14.CJLCD.2026-0152

Anchoring study between subwavelength gold grating and liquid crystal interface

HU Ying, WEI Sui*, ZHANG Zelin, SHEN Chuan, QU Lei

(State Key Laboratory of Optoelectronic Information Acquisition and Protection Technology,
Anhui University, Hefei 230039, China)

Abstract: To address the issues of abnormal liquid crystal alignment and efficiency loss induced by direct immersion of subwavelength gold gratings in liquid crystal, we propose a novel anchoring scheme using polymethyl methacrylate (PMMA) as the photoresist for gold grating patterning, the trench-filling material, and the alignment layer for the upper substrate of the liquid crystal cell. This design simplifies

收稿日期:2026-08-14;修订日期:2026-10-12.

基金项目:国家自然科学基金(No. 62271005);安徽省高校自然科学基金(No. 2022AH050089, No. KJ2020ZD02)

Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 62271005); Natural Science Foundation of Higher Education Institutions of Anhui Province (No. 2022AH050089, No. KJ2020ZD02)

*通信联系人, E-mail: swei@ahu.edu.cn

the fabrication process, realizes uniform liquid crystal alignment, and avoids the liquid crystal infiltration problem. To reveal the anchoring behavior of subwavelength gold gratings in direct contact with liquid crystal and clarify the performance limitations of the direct infiltration scheme, we first fabricated two groups of liquid crystal cells and experimentally investigated the molecular alignment via cross-polarized optical microscopy. Two groups of liquid crystal cells are fabricated, with the alignment direction of the bottom substrate under the gold grating was set parallel and perpendicular to the grating lines, respectively. Note that liquid crystal molecules align along the grating lines on the subwavelength gold grating samples, which induces a twisted molecular configuration in the samples. Such an alignment is not the preferred parallel anchoring mode for classic phase modulator technologies. Furthermore, its orientation is orthogonal to the polarization direction of surface plasmon polaritons (SPPs) excited by the gold grating resonance, so the grating resonance cannot be effectively tuned by the variation of liquid crystal refractive index to achieve dynamic tuning. Based on the interfacial alignment characteristics observed in the above experiments, TechWiz 3D software is further used to simulate the changes in the liquid crystal director on the lower surface of the gold grating under power conditions for two schemes: filling the gold grating groove with PMMA and liquid crystal, and the corresponding effective refractive index variation of liquid crystal at the grating lower surface is obtained. The derived effective refractive index data are then imported into FDTD Solutions software to compare the reflection phase modulation and reflectivity characteristics between two schemes: gold grating trenches filled with PMMA and filled with liquid crystal. Simulations demonstrate that compared with the liquid crystal filling scheme, the PMMA filling scheme achieves a more complete $0 \sim 2\pi$ phase modulation range and superior reflectivity performance. This work demonstrates that the PMMA planarization layer is a promising technical solution for liquid-crystal-tunable optical metasurface devices.

Key words: subwavelength gold gratings; phase modulation; liquid crystal cell anchoring; effective refractive index of liquid crystal; PMMA planarization layer

1 引言

过去十年,可动态调控光场的光学超表面技术取得了长足发展^[1-4]。由亚波长单元构成的二维阵列可通过电、光、热、机械等方式调控光学超表面的几何、材料参数,实现动态波前调控,例如透明导电氧化物、液晶、相变材料、热光材料以及二维材料,可完成动态光束扫描、变焦透镜成像、偏振转换等功能。其中,电控相位空间光调制器能够对光场多维度参量实现操控,在激光雷达、全息显示、光通信、光计算等领域具备重要应用价值。

传统电控空间光调制器(Spatial Light Modulator, SLM)主要分为硅基液晶(Liquid Crystal on Silicon, LCoS)器件和微机电系统(Microelectromechanical Systems, MEMS)两大类^[5-6]。其中,液晶驱动的SLM具有较高的工业成熟度和

较大的折射率变化量(Δn 在0.1至0.3范围内),正快速应用于新一代显示器、自适应光学及光通信等领域,AR/VR与全息视频显示被认为是3D显示技术的终极发展目标,这类高端显示需具有极高的空间带宽积和相位调制能力。但传统SLM器件体积庞大,且通常需要较高驱动电压,所以具有亚波长特征尺寸的SLM成为突破上述局限的关键技术。

为此,本课题组利用亚波长金光栅所具备的独特性能,包括其显著的共振增强效应、实现超衍射极限的分辨能力以及对边界条件变化的敏感性等,通过将亚波长金光栅嵌入经典LCoS,设计了一种新型的SLM(G-LCoS)^[7-8],利用光栅加波导的共振机制在横磁(Transverse Magnetic, TM)偏振入射光场下实现反射相位调制。同时保证G-LCoS具有 $1\mu\text{m}$ 像素分辨率和700nm盒厚,这种液晶盒的作用是在电场下实现必要的介

电常数调制范围,作为金光栅共振的界面条件,同时与金光栅构成电控光调制结构。课题组在前期的工作中采用基于表面阻抗边界条件和精确模方法,推导了它的理论模型,并制作了样盒,样盒测试与计算结果定性一致^[9-10]。进一步研究是要把概念验证的样盒提升为可用器件的样品系统,这项工作需要研究的问题还很多,其中一项重要的工作是开展金光栅与液晶界面之间的锚定问题的研究。

近年来已有若干研究从不同角度探索此问题。Veetil等人^[11]在液晶作为有源调制纳米天线结构的研究发现纳米结构对液晶的锚定方向具有决定性影响。Wang等人^[12]指出,超表面结构可在亚微米尺度上实现高分辨率的液晶取向图案化,但取向均匀性受结构几何参数显著制约。Gorkunov等人^[13]则通过聚焦离子束纳米图案化技术实现了液晶预倾角的精确局域调控,揭示了微纳图案表面液晶锚定能的复杂分布特征。Wang等人^[14]通过像素化光取向技术实现了空间任意分布的液晶矢量取向调控,证实了液晶指向矢分布均匀性直接决定光场相位与偏振的调控精度。Kasyanova等人^[15]研究了液晶在铝亚波长纳米光栅上的取向行为,指出当狭缝与光栅周期比小于2/3时,液晶分子在光栅表面可实现稳定的平面取向;大于2/3时取向会转变为多种倾斜角并存的畴结构。综上所述,如果将亚波长结构直接浸润在液晶中,液晶分子的取向复杂,降低了调制的效率,一种有效的解决思路是利用聚甲基丙烯酸甲酯(Polymethyl Methacrylate, PMMA)同时实现物理隔离与取向诱导。Zhang等人^[16]的研究表明PMMA包裹可有效阻隔液晶分子进入纳米光栅狭缝,同时增强等离激元共振响应。Liu等人^[17]采用纳米压印光刻成功制备了周期100nm、线宽50nm的超精细PMMA纳米光栅,该结构具备显著的各向异性表面能,可有效诱导液晶分子沿栅线方向排列。Huang等人^[18]证实PMMA可作为电子束光刻底层牺牲模板,结合双层胶工艺制备高精度亚波长金光栅,验证PMMA作为光栅图形化介质的可行性。

得益于上述启发,本文面向亚波长特征尺寸的相位调制SLM给出一个新的锚定方案。首先通过正交偏光显微镜实验表征G-LCoS中深亚

波长金光栅表面的液晶本征取向规律,确定具体的锚定技术方案,即采用PMMA作为制备金光栅的光刻胶,也作为槽内填充;既简化了制备工艺,又平坦化了取向层。进一步利用TechWiz 3D软件模拟金光栅槽内分别填充PMMA和液晶时金光栅下表面液晶在加电情况下的指向矢变化,给出金光栅下表面液晶有效折射率的变化值作为调节反射相位的下边界条件。将得到的液晶有效折射率数据导入到FDTD Solutions软件,对光栅槽中分别填充PMMA和液晶两种结构的反射相位和反射率进行比较,其中,反射相位指入射光经器件结构反射后,反射光波相对于入射光波的相位延迟总量,是衡量相位型空间光调制器调制能力的核心物理量;反射率指器件的总反射光功率与入射光功率的比值,用于表征器件对入射光的反射能力,通常以百分比形式呈现。为面向高空间带宽积动态全息显示的等离激元液晶空间光调制器的结构设计与液晶界面取向优化方案提供实验依据与FDTD的仿真验证。

2 设计方案

在传统相位调制的LCoS中,如图1所示,液晶通常被约束在由上、下平行平面构成的方盒中,通过平行锚定,合适外部电场将诱发盒中液晶分子的运动,实现器件的物理(光)性质的电(磁)可调谐性的独特效应^[18],此效应可由下面的自由能描述:

$$W = \int_{\Omega} (W_{OF} + W_E + W_M) dx + \int_{\partial\Omega} W_B ds, \quad (1)$$

其中, W_{OF} 表示弹性效应, W_E 表示电光效应, W_M 表示磁光效应, W_B 表示边界效应, $\partial\Omega$ 表示液晶的锚定层。

锚定层附近的液晶分子具有特定的首选分子取向(也称易轴),边界效应对应的表面锚定自

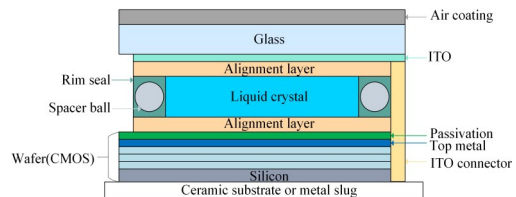


图1 典型的硅基液晶空间光调制器的液晶盒结构
Fig. 1 Liquid crystal cell structure of typical LCoS

由能 W_B 会阻碍分子取向偏离易轴,因此,表面锚定特性对理解和控制光电器件都很重要^[19-20]。虽然液晶驱动的空间光调制器——LCoS技术具有较高的工业成熟度,但是,遗憾的是它的锚定技术不能简单地用到超表面结构中。

导致这一结论的根本原因是液晶分子直接接触金光栅时,几何轮廓锚定将不可避免地迫使分子沿沟槽方向排列,如图2所示,会在G-LCoS中形成扭曲形式。这种扭曲结构是电控相位LCoS不采用的锚定方式,更严重的是这一取向方向与SPP激发的TM偏振方向正交,导致等离激元模式无法有效建立^[21],如图3所示。

针对上述由锚定机制引发的取向-偏振正交矛盾,本结构引入PMMA作为制备金光栅的光刻胶、槽内填充和上基板的锚定层、平坦化锚定

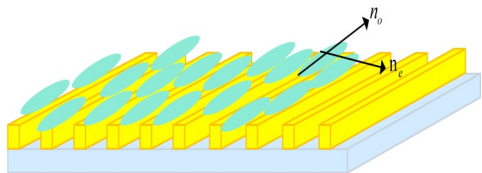


图2 液晶分子沿光栅槽的排列方向示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the alignment of liquid crystal molecules along the grating grooves

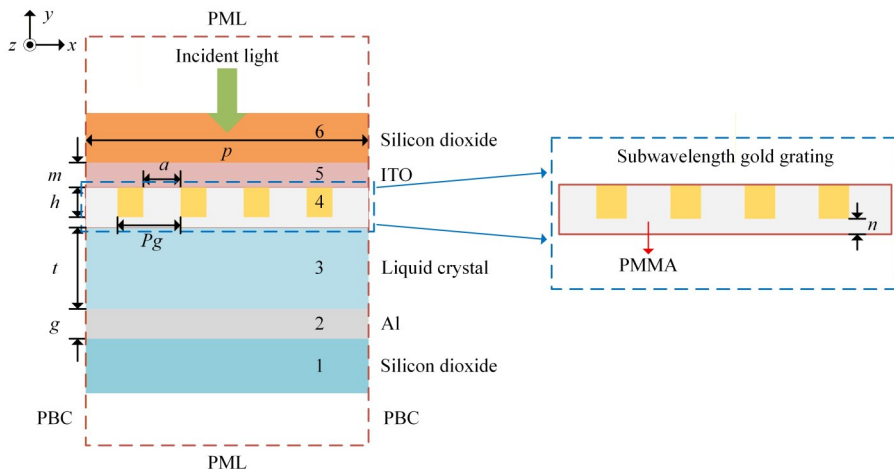


图4 G-LCoS像素结构示意图

Fig. 4 Schematic diagram of G-LCoS pixel structure

3 实验结果与分析

为了更好的说明第2节提到的“取向-偏振正

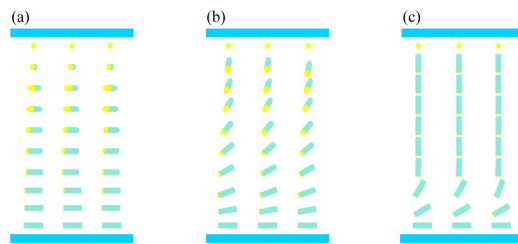


图3 不同电压调控下三种液晶分子排布示意图。(a) 低驱动电压;(b) 中驱动电压;(c) 高驱动电压。

Fig. 3 Schematic diagram of three types of liquid crystal molecular alignment under different applied voltages. (a) Low driving voltage; (b) Medium driving voltage; (c) High driving voltage.

交”问题,首先对本课题采用的金亚波长光栅的取向行为进行了实验测定。如图5所示,实验样本采用 $20\text{ mm} \times 20\text{ mm}$ 、ITO层厚度约 25 nm 的

导电玻璃作为上玻璃基板,制备 $1026\ \mu\text{m} \times 300\ \mu\text{m}$ 金光栅区,金光栅周期 $250\ \text{nm}$ 、槽宽 $100\ \text{nm}$,高 $100\ \text{nm}$ 。

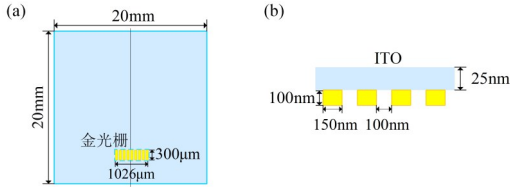


图5 上玻璃基板结构设计图。(a)俯视图;(b)正视图。

Fig. 5 Upper glass substrate structure design diagram.
(a) Top view; (b) front view.

随后制备两组下玻璃基板,通过摩擦取向工艺分别设置与金光栅栅线平行、垂直的锚定方向。将上下基板对位封装制成空液晶盒,采用毛细管法灌注 E7 型向列相液晶,待液晶取向稳定后开展表征实验。采用搭载正交偏光模块的金相显微镜,从金光栅基板一侧观测液晶分子的取向行为。测试中起偏器与检偏器保持正交配置,偏振方向分别固定于 0° 与 90° 方位,通过旋转液

晶盒样品记录视场明暗变化规律。如图 6 所示,红色虚线部分为金光栅区域。

对于下基板取向与栅线平行的样品,当样品旋转至 0° 与 90° 方位时,光栅区域呈现消光暗场,无光栅的背景区域亮度较高;旋转至 45° 方位时,光栅区域亮度达到峰值。根据向列相液晶双折射的正交偏光消光规律:当液晶分子长轴与起偏方向平行时,入射线偏振光的偏振态不发生改变,无法透过正交检偏器,视场呈现消光;当分子长轴与起偏方向呈 45° 夹角时, o 光与 e 光振幅相等,偏振干涉相长效应最强,视场亮度最高。可判定,光栅区域的液晶分子长轴与栅线方向一致,即沿栅线方向平行排列。对于下基板取向与栅线垂直的样品,光栅区域在 0° 与 90° 方位下呈现亮场, 45° 方位下呈现消光暗场,明暗规律与平行取向样品完全相反。该现象同样表明,光栅区域的液晶分子始终沿金光栅栅线方向排列。综上,无论下基板取向层方向如何设置,液晶分子在直接接触金光栅表面时,均受几何轮廓锚定效应主导,沿栅线方向稳定排列。

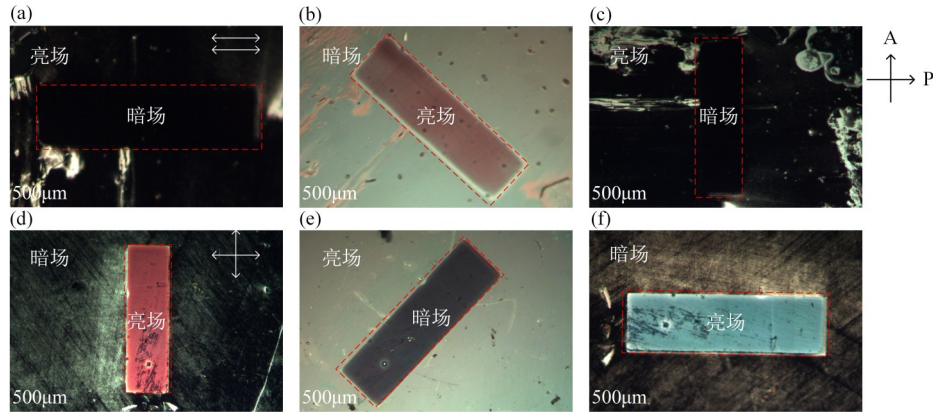


图6 正交偏光显微镜观测图。(a)取向与金光栅栅线平行时 0° 方位;(b)取向与金光栅栅线平行时 45° 方位;(c)取向与金光栅栅线平行时 90° 方位;(d)取向与金光栅栅线垂直时 0° 方位;(e)取向与金光栅栅线垂直时 45° 方位;(f)取向与金光栅栅线垂直时 90° 方位。

Fig. 6 Orthogonal polarizing microscope observation image. (a) 0° orientation when parallel to the gold grating lines; (b) 45° orientation when parallel to the gold grating lines; (c) 90° orientation when parallel to the gold grating lines; (d) 0° orientation when perpendicular to the gold grating lines; (e) 45° orientation when perpendicular to the gold grating lines; (f) 90° orientation when perpendicular to the gold grating line.

其次,本节以本课题组前期设计的 G-LCoS 结构为研究对象,如图 4 所示,采用液晶指向矢仿真和光学特性仿真的两步法开展系统数值研究,

验证结构的反射相位调制性能和反射率特性^[22-23]。

针对光栅槽内填充 PMMA 和填充液晶两种

典型方案,先采用 TechWiz 3D 软件对单个 G-LCoS 像素结构进行仿真。两种方案在仿真模型中设置不同的锚定边界条件:PMMA 填充方案

如图 7 所示,红色虚线为锚定边界条件。将上述不同电压下的液晶有效折射率数据导入 FDTD Solutions 软件,对两种填充方案的金光栅光学特

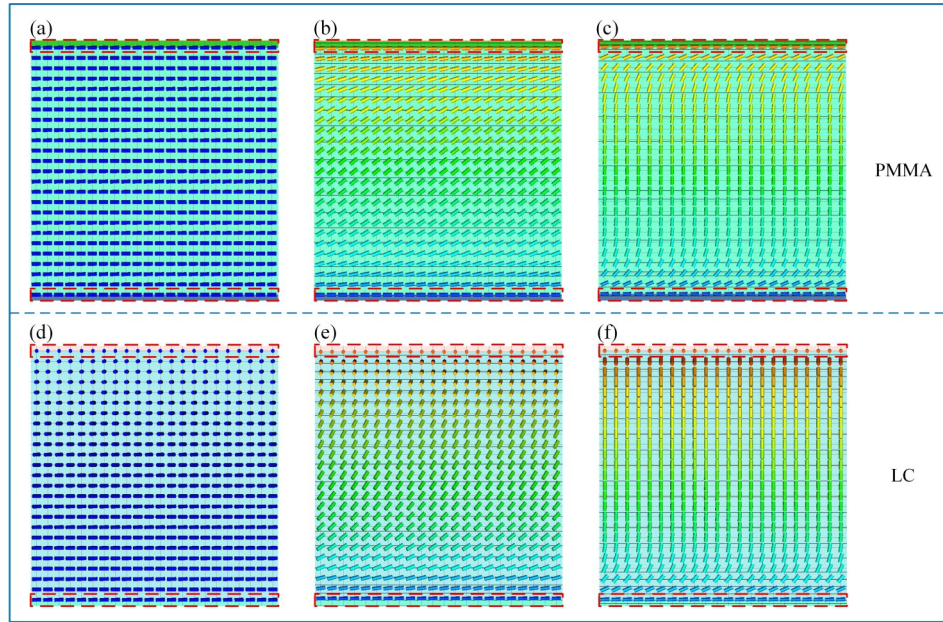


图 7 填充不同介质时金光栅下表面的液晶指向矢分布图。(a) 电压为 0 V; (b) 电压为 1.5 V; (c) 电压为 5 V; (d) 电压为 0 V; (e) 电压为 1.5 V; (f) 电压为 4.5 V。

Fig. 7 Liquid crystal director distribution on the lower surface of the gold grating with different filling media. (a) The voltage is 0 V; (b) The voltage is 1.5 V; (c) The voltage is 5 V; (d) The voltage is 0 V; (e) The voltage is 1.5 V; (f) The voltage is 4.5 V.

中,液晶上下界面的面内锚定方向均垂直于光栅栅线,实现均匀平行取向;液晶填充方案中,液晶下边界面内锚定方向垂直于光栅栅线,上边界(光栅接触面)面内取向平行于光栅栅线,上下边界取向正交,形成扭曲液晶结构。在此边界条件下计算不同驱动电压下金光栅下表面处的液晶分子偏转角,进而得到对应界面的液晶有效折射率。仿真采用 E7 型向列相液晶,其中 PMMA 填充方案的电压扫描范围为 0~5V,计算得到光栅界面处液晶有效折射率变化范围为 1.538~1.7757;液晶填充方案的电压扫描范围为 0~4.5V,对应有效折射率变化范围为 1.538~1.6772。本文选取起始、中间与最高工作电压点,分别给出两种填充方案下金光栅下表面的液晶指向矢分布仿真图:PMMA 填充方案对应 0V、1.5V、5V 三个电压点,液晶填充方案对应 0V、1.5V、4.5V 三个电压点,直观呈现不同驱动强度下液晶分子的偏转行为与取向分布规律,

性进行仿真计算。仿真设置入射光波长扫描范围为 400~700nm,基于 FDTD Solutions 软件构建模型计算对应不同有效折射率和波长下的反射相位和反射率。G-LCoS 的具体结构参数与仿真参数设置如表 1 和表 2 所示。

仿真结果表明,在上述几何参数条件下,填

表 1 结构参数设置

Tab. 1 Structure parameterization

Structure parameter	PMMA value/nm	LC value/nm
ITO thick (m)	15	15
Au thick (h)	120	120
LC thick (t)	700	700
Al thick (g)	50	50
PMMA thick (n)	20	/
Grating period (Pg)	250	250
Grating slit (a)	190	190
Pixel unit	1000	1000

表2 FDTD仿真参数设置

Tab. 2 FDTD simulation parameterization

Simulation parameter	Parameter value
Mesh size/nm	4
Background material	SiO ₂
PML layer	12
Time step/fs	0.0106139(default) x min bc: Periodic
Boundary conditions	y min bc: PML y max bc: PML

充介质为PMMA时可达到近 $0\sim 2\pi$ 的相位调制范围,填充介质为液晶时无法达到 $0\sim 2\pi$ 的相位

调制范围,如图8所示。当光栅槽内填充PMMA时,金光栅与PMMA介质层共同构成等离激元波导结构,SPP-FP耦合共振效应显著,随着液晶有效折射率从寻常折射率 n_o 向非寻常折射率 n_e 连续变化,在波长为448.75nm时反射相位调制范围达到 $0\sim 1.995\pi$,满足全相位调控的基本要求。当光栅槽内直接填充液晶时,液晶介质既作为谐振腔的一部分参与等离激元共振,又作为电控可调介质提供折射率变化,在波长为486.25nm时相位调制范围仅仅为 $0\sim 1.12\pi$,由于液晶直接进入狭缝,其取向均匀性与锚定稳定性需在实际器件制备中予以重点考量。

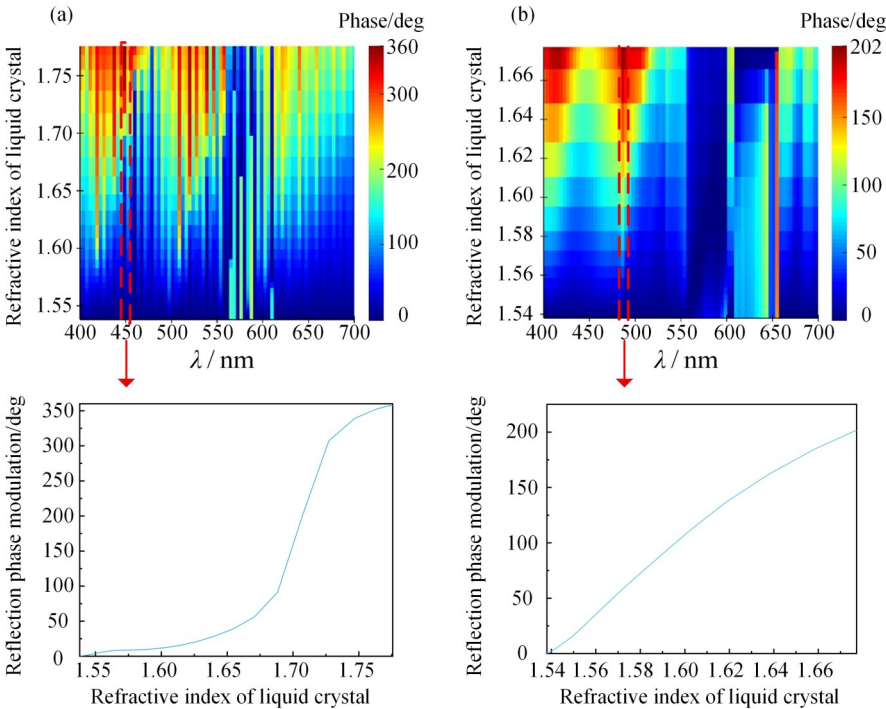


图8 填充不同介质时的反射相位。(a) 填充介质为PMMA, $\lambda=448.75\text{ nm}$ 时的反射相位;(b) 填充介质为液晶, $\lambda=486.25\text{ nm}$ 时的反射相位。

Fig.8 Reflection phases when the filling medium is different. (a) Reflection phase when the filling medium is PMMA and $\lambda=448.75\text{ nm}$; (b) Reflection phase when the filling medium is liquid crystal and $\lambda=486.25\text{ nm}$.

在反射率特性方面,两种填充方案同样表现出显著的性能差异,如图9所示。仿真结果显示,光栅槽内填充PMMA时,器件反射率随液晶有效折射率变化的波动范围为25.82%~45.3%;而光栅槽内直接填充液晶时,反射率变化范围仅为8.73%~19.29%,整体反射水平不足PMMA方案的一半。究其原因,PMMA填充方案中金光栅与均质PMMA介质

共同构成边界条件稳定的等离激元谐振结构,能够有效维持SPP共振强度并降低模式传输损耗;而液晶直接填充沟槽时,分子取向的空间非均匀性会引入额外散射损耗,同时谐振腔介质环境的复杂化也会削弱共振耦合效果,最终导致反射率大幅下降。综合相位调制范围与反射率特性两方面来看,PMMA平坦化填充方案在实现更大相位调制量的同时,兼具更优的振幅

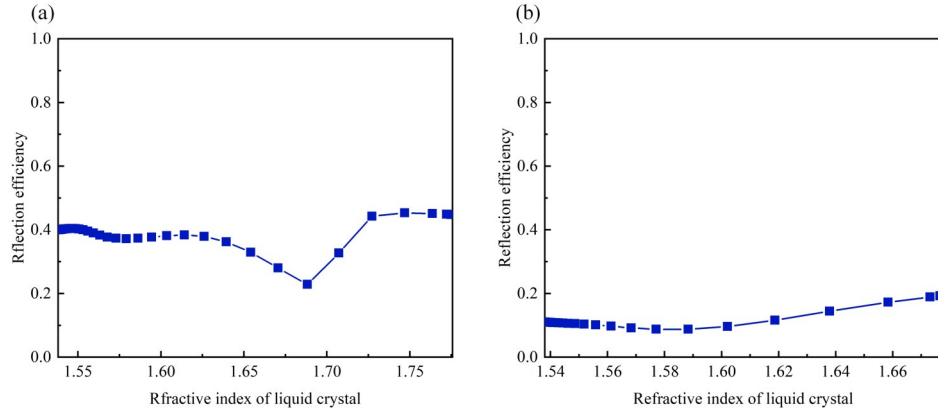


图9 填充不同介质时的反射率。(a) 填充介质为PMMA, $\lambda = 448.75$ nm时的反射率;(b) 填充介质为液晶, $\lambda = 486.25$ nm时的反射率。

Fig. 9 Reflection efficiency when the filling medium is different. (a) Reflection efficiency when the filling medium is PMMA and $\lambda = 448.75$ nm; (b) Reflection efficiency when the filling medium is liquid crystal and $\lambda = 486.25$ nm.

输出特性与能量利用效率,整体光学性能优于液晶直接填充方案。

4 结 论

本文针对亚波长金光栅与液晶锚定时,几何锚定引发的液晶取向与表面等离激元激发偏振正交的核心矛盾,结合实验表征与数值仿真开展研究。实验制备了周期250nm、槽宽100nm的金光栅结构,经正交偏光显微镜观测证实,液晶直接接触光栅时取向平行于栅线,与等离激元激发所需偏振方向正交,验证了引入PMMA平坦化

层的必要性。仿真结果表明,在相位调制性能方面,光栅槽内填充PMMA时可实现近 $0 \sim 2\pi$ 的反射相位调制范围,而直接填充液晶时无法达到 $0 \sim 2\pi$ 相位调制范围;在反射率特性方面,PMMA填充方案的反射率随液晶折射率变化的波动范围为25.82%~45.3%,液晶填充方案仅为8.73%~19.29%,前者整体反射率显著高于后者。综上,PMMA平坦化层填充方案可同时解决取向偏振正交的界面矛盾,并在相位调制范围与反射率两方面均表现出更优的光学性能,为等离激元液晶空间光调制器的结构优化与界面设计提供参考。

参 考 文 献:

- [1] DOLAN J A, CAI H, DELDICQUE L, *et al.* Broadband liquid crystal tunable metasurfaces in the visible: liquid crystal inhomogeneities across the metasurface parameter space [J]. *ACS Photonics*, 2021, 8(2): 567-575.
- [2] BUCHNEV O, PODOLIAK N, KALTENECKER K, *et al.* Metasurface-based optical liquid crystal cell as an ultrathin spatial phase modulator for THz applications [J]. *ACS Photonics*, 2020, 7(11): 3199-3206.
- [3] DONG C, WANG J, HUANG B, *et al.* High-efficiency near-infrared beam steering enabled by a CMOS-driven liquid-crystal metasurface [J]. *Nano Letters*, 2026, 26(19): 6341-6348.
- [4] YU D, LOU S, OU X, *et al.* Polarization independent dynamic beam steering based on liquid crystal integrated metasurface[J]. *Scientific Reports*, 2024, 14(1): 23627.
- [5] 郑义微, 王迪, 李移隆, 等. 基于液晶空间光调制器的大视角全息显示技术[J]. 液晶与显示, 2021, 36(6): 789-796. ZHENG Y W, WANG D, LI Y L, *et al.* Holographic display technology with large viewing angle based on liquid crystal spatial light modulator [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2021, 36(6): 789-796. (in Chinese)
- [6] ZHANG Z, YOU Z, CHU D. Fundamentals of phase-only liquid crystal on silicon (LCOS) devices [J]. *Light: Science & Applications*, 2014, 3(10): e213-e213.
- [7] 沈川, 韦穗, 虞海秀, 等. 基于亚波长光栅结构的硅基液晶器件模型研究[J]. 光学学报, 2020, 40(3): 0305001.

- SHEN C, WEI S, YU H X, *et al.* Model of liquid crystal on silicon device with sub-wavelength grating structure [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(3): 0305001. (in Chinese)
- [8] 王庄. 内置亚波长金光栅的类 LCoS 多层结构的衍射特性计算[D]. 合肥: 安徽大学, 2023.
- WANG Z. Computation of diffraction characteristics of LCoS-like multilayer structure with sub-wavelength gold grating [D]. Hefei: Anhui University, 2023. (in Chinese)
- [9] 张明华. 深亚波长光栅结构的相位调控器件模型研究[D]. 合肥: 安徽大学, 2017: 40-47.
- ZHANG M H. On the model of phase modulation device upon deep sub-wavelength grating structure [D]. Hefei: Anhui University, 2017: 40-47. (in Chinese)
- [10] DEPINE R A. Perfectly conducting diffraction grating formalisms extended to good conductors via the surface impedance boundary condition [J]. *Applied Optics*, 1987, 26(12): 2348-2354.
- [11] MARUTHIYODAN VEETIL R, XU X, DONTABHAKTUNI J, *et al.* Nanoantenna induced liquid crystal alignment for high performance tunable metasurface [J]. *Nanophotonics*, 2024, 13(12): 2127-2139.
- [12] WANG J, LI K, HE H, *et al.* Metasurface-enabled high-resolution liquid-crystal alignment for display and modulator applications [J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2021, 16(1): 2100396.
- [13] Gorkunov M V, Kasyanova I V, Artemov V V, *et al.* Precise local control of liquid crystal pretilt on polymer layers by focused ion beam nanopatterning[J]. *Beilstein journal of nanotechnology*, 2019, 10(1): 1691-1697.
- [14] Wang Z Y, Zhou Z, Zhang H, *et al.* Vectorial liquid-crystal holography[J]. *Elight*, 2024, 4(1): 5.
- [15] KASYANOVA I V, GEIVANDOV A R, ARTEMOV V V, *et al.* Nematic liquid crystal alignment on subwavelength metal gratings [J]. *Beilstein Journal of Nanotechnology*, 2018, 9(1): 42-47.
- [16] ZHANG S, WANG Q, XU B, *et al.* Electrically switchable multicolored filter using plasmonic nanograting integrated with liquid crystal for optical storage and encryption [J]. *Optics Express*, 2023, 31(7): 11940-11953.
- [17] LIU Y J, LOH W W, LEONG E S P, *et al.* Nanoimprinted ultrafine line and space nanogratings for liquid crystal alignment [J]. *Nanotechnology*, 2012, 23(46): 465302.
- [18] HUANG X, SHAO J, ZHANG S, *et al.* A novel PMMA/NEB bilayer process for sub-20 nm gold nanoslits by a selective electron beam lithography and dry etch [J]. *Microelectronic Engineering*, 2017, 172: 13-18.
- [19] JAGODIČ U, PIŠLJAR J, JELEN A, *et al.* Three-dimensional planar alignment of nematic liquid crystal by direct laser writing of nanograting [J]. *ACS Photonics*, 2025, 12(11): 5970-5977.
- [20] HALLAM B T, SAMBLES J R. Groove depth dependence of the anchoring strength of a zero order grating-aligned liquid crystal [J]. *Liquid Crystals*, 2000, 27(9): 1207-1211.
- [21] LALANNE P, HUGONIN J P, RODIER J C. Theory of surface plasmon generation at nanoslit apertures [J]. *Physical Review Letters*, 2005, 95(26): 263902.
- [22] 王柳, 王庄, 李韵九, 等. 非对称边界的亚波长金光栅反射相位调制[J]. *激光与光电子学进展*, 2024, 61(13): 1305001.
- WANG L, WANG Z, LI Y J, *et al.* Reflection phase modulation of subwavelength gold gratings with asymmetric boundaries [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2024, 61(13): 1305001. (in Chinese)
- [23] 李韵九, 韦穗, 郝学锋, 等. 液晶调控下的亚波长金光栅反射相位[J]. *液晶与显示*, 2024, 39(11): 1445-1453.
- LI Y J, WEI S, HAO X F, *et al.* Reflection phase of subwavelength gold grating modulated by liquid crystal [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystal and Displays*, 2024, 39(11): 1445-1453. (in Chinese)

作者简介:



胡 迎,女,硕士研究生,2024 年于湖北第二师范学院获得学士学位,主要从事光学显示方面的研究。E-mail: 17786638020@163.com



韦 穗,女,教授,1969 年毕业于南京工学院(现东南大学),主要从事全息成像等领域的研究。E-mail: swei@ahu.edu.cn