

基于亚波长光栅结构的硅基液晶器件模型研究

沈川, 韦穗*, 虞海秀, 陶波

安徽大学计算智能与信号处理教育部重点实验室, 安徽 合肥 230601

摘要 金(Au)亚波长光栅被溅射到经典硅基液晶(LCoS)的ITO电极上,它与薄液晶盒和底层铝电极组成复合共振波导结构,简称GLCoS。与基于液晶传播效应的LCoS截然不同,在GLCoS中,上电极的表面等离子激元与光栅槽中的TM-FP(TM-Fabry Péro)共振耦合,诱导一个0阶反射的相位调制;铝(Al)电极既是反射背板又与Au光栅、薄液晶盒组成波导,使共振耦合得到增强。在操控光波阵面的同时,GLCoS也作为电控器件,施加电压改变液晶的折射率,进而控制开腔FP的边缘介质条件,达到有源 $0\sim 2\pi$ 相位调制。实验结果表明,本文结构可用于 $1\mu\text{m}$ 量级像素的相位空间光调制器,在高空间带宽积的全息视频显示中具有广阔的应用前景。

关键词 光栅; 全息视频显示; 亚波长金属光栅; 法布里-珀罗共振; 硅基液晶

中图分类号 O436

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.0305001

Model of Liquid Crystal on Silicon Device with Sub-Wavelength Grating Structure

Shen Chuan, Wei Sui*, Yu Haixiu, Tao Bo

Key Laboratory of Intelligent Computing & Signal Processing, Ministry of Education, Anhui University, Hefei, Anhui 230601, China

Abstract Herein, a sub-wavelength gold (Au) grating is sputtered onto an indium tin oxide electrode of a classical liquid crystal on silicon (LCoS). After it is mounted on a thin liquid-crystal cell with a bottom aluminum electrode, a composite resonant waveguide structure, namely GLCoS, is created. In contrast to LCoS that operates based on liquid-crystal propagation effects, in the GLCoS, the surface plasmon of the upper electrode is resonantly coupled with a TM-Fabry-Pérot (TM-FP) resonator in the grating slits to induce a phase modulation of zero-order reflection. The aluminum electrode acts as a reflective backing plate and contributes the waveguide with the Au grating and thin liquid-crystal cell, which enhances the resonance coupling. While acting as an optical device to control the wavefront, the GLCoS also operates as an electronic control device, applying voltage to change the refractive index of the liquid crystal cell; it can control the dielectric condition of the open cavity FP at the boundary to achieve an active $0\sim 2\pi$ phase modulation. The experimental results show that the proposed GLCoS structure can be used in phase-spatial light modulators with the $1\text{-}\mu\text{m}$ -level pixel, and it has prospects for application in holographic video displays with high spatial bandwidth product.

Key words gratings; holographic video display; sub-wavelength metal grating; Fabry-Pérot resonance; liquid crystal on silicon

OCIS codes 050.2230; 120.5060; 050.6624; 070.6120

1 引 言

光波阵面的时空控制有广泛和重要的应用,例如光束整形、成像、全息术、光镊和遥感。但是,经典空间光调制器(SLM)的特征尺寸远大于光波长量

级,这限制了该技术的应用。以全息视频显示为例,全息视频显示被公认为是未来3D显示的终极产品,但它需要高的空间带宽积^[1]。遗憾的是,目前可用的SLM,例如硅基液晶(LCoS),虽然采用了CMOS工艺,比TFT工艺的LCD-SLM有更小的

收稿日期: 2019-09-02; 修回日期: 2019-09-30; 录用日期: 2019-10-12

基金项目: 国家自然科学基金(61605002, 61501001, 61301296)、安徽省自然科学基金(1508085MF121, 1608085QF161)、安徽省高等学校自然科学基金项目(KJ2016A029)

* E-mail: swei@ahu.edu.com

像素尺寸,但是,其像素尺寸仍然在几微米量级。如果简单地将 LCoS 的像素缩小到 $1\ \mu\text{m}$ 量级,则至少要求液晶盒厚度小于 $1\ \mu\text{m}$ 并且能实现 2π 的波阵面调制,从材料的角度看,目前几乎是不可行的^[2]。除 LCoS 外,还有子波长微机电系统(MEMS)、碳纳米管、基于各向异性漏模耦合的空间光调制器^[3],但是,所有这些技术在实际应用中仍然有待进一步突破。

近年来,亚波长光栅,即周期 d 小于入射光波长 λ 的光栅,特别是具有表面等离子激元(SPP)效应的金属光栅,为实现微纳尺寸光器件提供可能^[4-6],这使得传统的光学元件与电子集成元件之间的不匹配问题有望得以解决。此外,金属结构可以同时承载光学和电学信号,非常适合用于电调制方式的 SLM。

与横向漏导模共振波导光栅不同^[7],有一定深度 h 的亚波长金属光栅($\lambda < d$)借助狭缝中传播导波(而不是亚波长孔径消逝波)耦合上、下 SPP 形成垂直表面的共振,该共振对应狭缝中基本 TM 导波的种类 FP(Fabry Péro)共振^[8],这种被称为 SPP 光栅的结构有极其重要的应用^[9-10]。进一步,Huang 等^[11]提出一种由狭缝光栅和背平面组成的 SPP 亚波长的 FP 共振的光子系统结构,这种结构非常高效,能克服金属欧姆损耗对质量因子的负作用,可覆盖微波到 THz 以及红外域的谱域,其实验装置^[12]由铝狭缝光栅、平面背板和一个可调谐的分离气隙组成,实验验证该结构在微波段具有适用性。

受文献[11-12]启发,本文将此种类型的结构应用于可见光波段,设计一种几何结构与典型的 LCoS 相似的有源 SLM 模型^[13-15],被简称为 GLCoS 反射相位空间光调制器,其上电极的亚波长金属光栅与界面的 SPP 共振耦合产生 TM-FP(TM-Fabry Péro)共振,底层铝电极作为反射背板和金属光栅之间几百纳米的薄液晶盒构成复合腔,使得 0 阶反射相位得到操控和增强,同时他们也充当水平锚定向列薄液晶盒的调制电极。利用液晶折射率随电压改变的量来操控 FP 共振腔的边缘介质条件,进而实现有源动态光场调制。本文技术原理的理论和模拟结果与文献[16]类似,但不同的是文献[16]中的超表面调制器的对应调制电压为 $\pm 4.7\ \text{V}$,工作波长为 $1.55\ \mu\text{m}$,不在可见光波段。

2 理论分析和器件设计

图 1 为简化的 GLCoS 结构示意图,亚波长光栅和底部基板由薄的介质区分开,设入射侧、缝内、介

质隔离子和金属的介电常数分别为 ϵ_1 、 ϵ_s 、 ϵ_3 和 ϵ_M (金属介电常数采用 Drude 模型),窄缝支持垂直亚波长 FP 共振,这样的共振可以通过 TM 偏振入射光激发。本文采用一种近似模态法,对确切模态方法采用两个主要的简化。首先,对于高传导和具有矩形横截面的线栅,采用金属表面阻抗边界条件(SIBC)^[17];其次,只考虑在狭缝内电磁场中的基本本征模,当光的波长大于狭缝宽度时,这种近似是合理的,因为一个亚波长光栅是一个第 0 级衍射光栅^[11]。

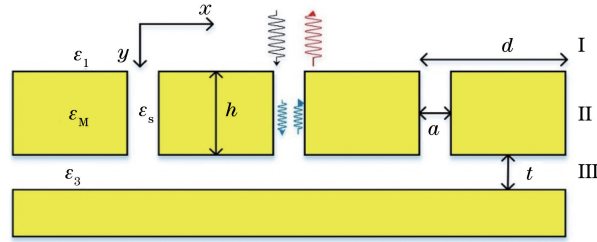


图 1 GLCoS 结构示意图

Fig. 1 Schematic of GLCoS structure

对 GLCoS 结构电磁场分布^[18]进行分区域描述。首先,在垂直入射边的区域 I,入射电磁波将被周期性 d 的界面散射,因此包括入射光和反射成分。将衍射阶 m 用傅里叶展开^[19-20],得到

$$H_z^{\text{in}}(x, y) = \exp[ik_0(\gamma_0 x - u_0 y)] + \sum_m R_m \exp[ik_0(\gamma_m x + u_m y)], \quad (1)$$

式中: R_m 为入射侧反射波场的振幅; m 代表衍射阶数; γ_m 和 u_m 是根据边界条件推导的中间参变量(其中 γ_0 和 u_0 是 0 阶中间参变量),表达式为 $\gamma_m = \sqrt{\epsilon_1 + m\lambda/d}$, $u_m = \sqrt{\epsilon_1 - \gamma_m^2}$; z 下标为垂直于入射面的方向; $k_0 = \omega/c$ 为自由空间中的波矢大小, ω 和 c 分别为光在自由空间传播的频率和速度。

当深度 h 大于金属材料的趋肤深度时,则可视作为高传导的金光栅的齿内部没有场。并且,因为光的波长远大于狭缝宽度 a ,狭缝中传播的导波耦合光栅上、下 SPP 形成垂直表面的共振,该共振对应基本 TM 导波的种类 FP 共振^[21-22]。FP 共振包括向下和向上成分,区域 II (亚波长金属光栅层)可以表示为

$$H_z^{\text{s}} = A \exp(iq_0 y) + B \exp(-iq_0 y), \quad (2)$$

式中:上标 s 为 II 层狭缝区域; A 和 B 分别为光波向上和向下传播的振幅; $q_0 = k_0 n_h$ 为纵向传播常数, $n_h = \sqrt{\epsilon_s [1 + 2i/(k_0 a \epsilon_M^{1/2})]}$ 为有效折射率。

在介质区 III,电磁场包括周期结构的透射(振幅 T_m)和底部的平面金属膜的反射(振幅 P_m)。这

样的场扩展可表示为

$$H_z(x, y) = \sum_m \{ T_m \exp[-ik_0 v_m (y + h)] + P_m \exp[ik_0 v_m (y + h)] \} \exp(ik_0 \gamma_m x), \quad (3)$$

式中: $v_m = \sqrt{\epsilon_3 - \gamma_m^2}$ 为周期性结构的散射部分; T_m 为第 m 阶衍射模。

通过傅里叶展开扩展边界匹配约束, 并使用分别位于光栅顶部、底部和两狭缝壁的 4 个 SIBC, 得到一个包含未知复振幅的线性方程组。通过这个方程组, 可以计算 0 阶反射系数为

$$R_0 = \kappa - \frac{\eta[1 + \chi r_3 \exp(2iq_0 h)]}{(1 + \theta_1^-)[1 - r_1 r_3 \exp(2iq_0 h)]}, \quad (4)$$

其中,

$$\kappa = \frac{u_0 - \epsilon_1 \epsilon_M^{-1/2}}{u_0 + \epsilon_1 \epsilon_M^{-1/2}}, \quad \eta = 2\omega \epsilon_1 g_0^2 u_0 \frac{\epsilon_s^{1/2} - \epsilon_M^{-1/2}}{(u_0 + \epsilon_1 \epsilon_M^{-1/2})^2},$$

$$\chi = \frac{\epsilon_s^{1/2} + \epsilon_M^{-1/2}}{\epsilon_s^{1/2} - \epsilon_M^{-1/2}}, \quad r_1 = \frac{1 - \theta_1^+}{1 + \theta_1^-}, \quad r_3 = \frac{1 - \theta_3^+}{1 + \theta_3^-},$$

$$w = a/d, \quad g_0 = \text{sinc}(k_0 \gamma_0 a/2),$$

$$\theta_1^\pm = (\sqrt{\epsilon_M \epsilon_s} \pm 1) \sum_{m=-\infty}^{\infty} \frac{w g_m^2}{1 + \sigma_m},$$

$$\theta_3^\pm = (\sqrt{\epsilon_M \epsilon_s} \pm 1) \cdot$$

$$\sum_{m=-\infty}^{\infty} \frac{w g_m^2 [1 - \rho_m \exp(2ik_0 v_m t)]}{(1 + \tau_m) [1 - \rho_m^2 \exp(2ik_0 v_m t)]},$$

$$\rho_m = \frac{1 - \tau_m}{1 + \tau_m}, \quad \tau_m = \frac{v_m \sqrt{\epsilon_M}}{\epsilon_3},$$

$$\sigma_m = u_m \epsilon_m^{1/2} / \epsilon_1, \quad g_m = \text{sinc}(k_0 \gamma_m a/2),$$

式中: $\sigma_m, u_m, \gamma_m, g_m, v_m$ 是根据边界条件推导的中间参变量。根据理论分析, 给出 GLCoS 的结构参数: l 为光栅长度、 a 为狭缝宽度、 h 为光栅高度、 d 为光栅周期、 t 为中介质层高度、 e 为铝电极高度, 如图 2 所示。

3 数值模拟平台和结果

为进行多参数的优化和面向制作工艺的稳健性分析, 将电磁场仿真软件 FDTD Solutions、CST 以及液晶指向矢仿真软件 TechWiz 集成一个仿真平台, 用于研究本文结构 $1 \mu\text{m}$ 像素中的周期性、波段带宽、光栅结构的稳健性以及薄液晶盒情况下的边缘场效应。仿真实验的总体流程如图 3 所示。

3.1 $1 \mu\text{m}$ 像素中的周期性和波段带宽研究

首先, 研究狭缝个数对结构调制性能的影响。金属的表面等离子特性与光波长有关, 实验时将波长设置为可见光波段, 分析垂直波导对狭缝周期性的依赖性。其中, 设定光栅高度 h 为 100 nm , 狭缝

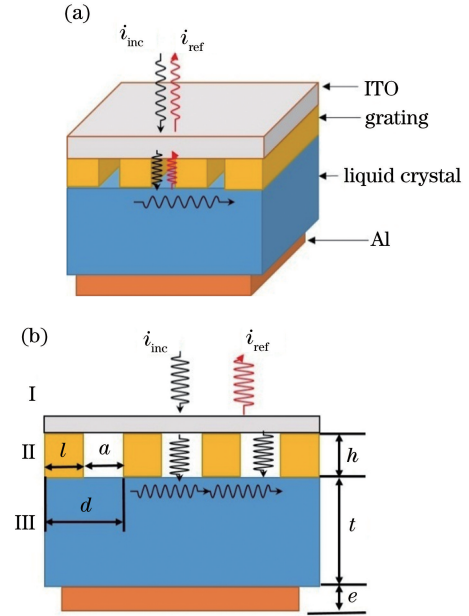


图 2 GLCoS 的结构设计图。(a) 本文模型的立体结构示意图; (b) 结构的横截面示意图
Fig. 2 Structural design drawing of GLCoS. (a) Stereo structure of proposed model; (b) cross-sectional schematic of structure

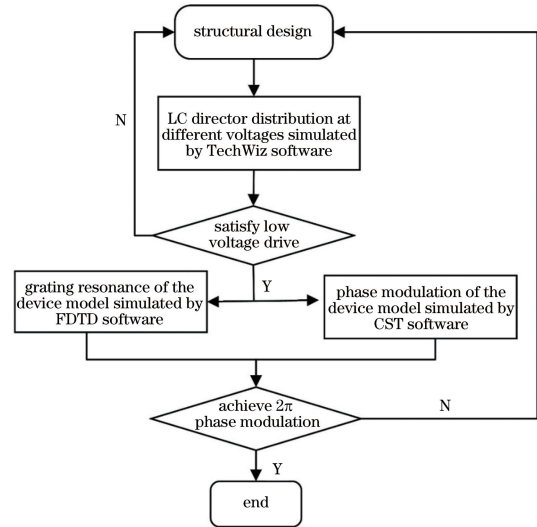


图 3 仿真总体流程图
Fig. 3 Overall flow chart of simulation

宽度 a 为 100 nm , 底部铝电极高度 e 为 50 nm , 实验结果如图 4 所示。当狭缝个数为 3, 在 $560 \sim 628 \text{ nm}$ 波长范围内可以实现连续 2π 相位的调制量。

接着, 研究不同深度参数下金属光栅的 FP 共振, 狭缝个数设定为 3, 光栅周期 d 设定为 250 nm , 光栅狭缝 a 为 100 nm , 光栅高度 h 是变化的, 分别为 $80, 100, 130, 150 \text{ nm}$ 。如图 5 所示, 当表面波到光栅狭缝时, 会产生垂直振荡, 即 FP 共振, 此时光栅狭缝中的电场由于共振作用, 得到异常的增强, 从

而实现在亚波长尺度上操纵反射光相位。

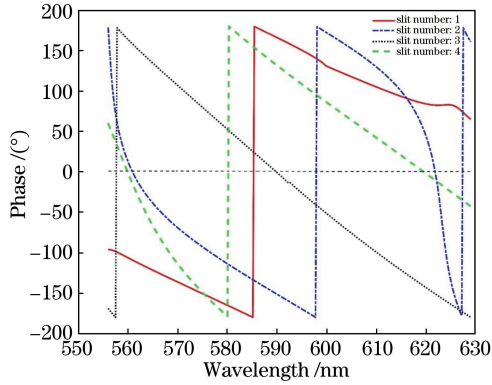


图 4 不同狭缝个数的相位调制曲线

Fig. 4 Phase modulation curves with different slit numbers

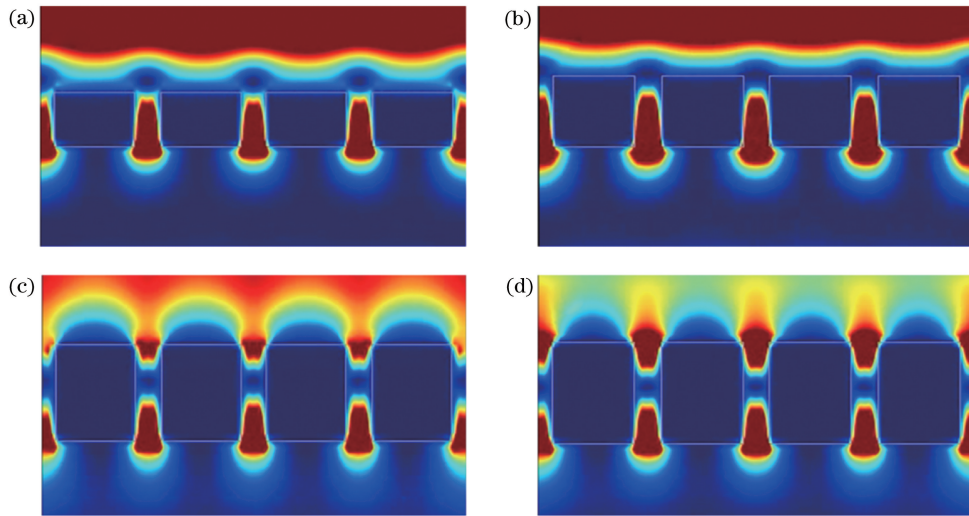


图 5 不同深度的金属光栅下的 FP 振荡。(a)光栅高度为 80 nm;(b)光栅高度为 100 nm;
(c)光栅高度为 130 nm;(d)光栅高度为 150 nm

Fig. 5 FP resonance at different depths of metal gratings. (a) Grating height of 80 nm; (b) grating height of 100 nm;
(c) grating height of 130 nm; (d) grating height of 150 nm

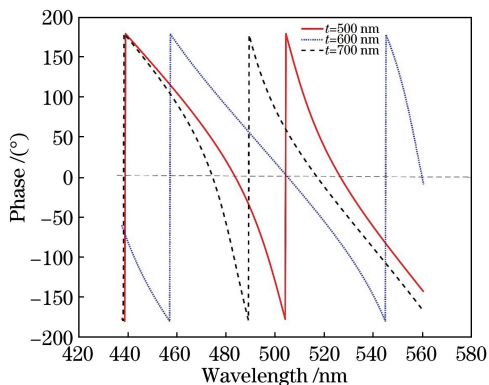


图 6 可见光范围内中间介质层厚度对相位的影响

Fig. 6 Influence of thickness of intermediate layer on phase in visible light range

仿真中,设定像素间隙分别为 260,280,300,320,340 nm。由于保持像素周期为 1 μm,相应的电

为进一步研究介质层厚度对相位调制量的影响,在 1 μm 内刻有三个狭缝周期,设置中间介质层的厚度 t 为 500,600,700 nm,实验结果如图 6 所示。当 t 为 600 nm 时,在波长 446 nm 和 542 nm 之间可以达到 2π 相位的调制量。

3.2 光栅结构稳健性分析

用 CST 软件研究本文结构的相位特性,由 TM 偏振光照射该结构,入射光一侧是空气,金属用 Drude 模型建模, $\epsilon_m = 1 - \omega_p^2 / (\omega^2 + i\omega\gamma)$,其中 $\omega_p = 1.37 \times 10^{16}$ rad/s 是金属等离子频率, $\gamma = 1.2 \times 10^{14}$ 为碰撞频率。中间媒介设定为折射率可以变化的材料,其折射率变化范围为 1.4~1.7。

极宽度将会减小,这里只讨论像素的间隙,得出的结果如图 7(a)所示,在 260~340 nm 的像素间隙变化几乎仍能实现 2π 相位的调制量。图 7(b)中当像素间隙为 260~340 nm 时都有比较强的反射率。然后在误差为 10 nm 范围内,改变光栅的高度和宽度,仍能实现接近 2π 相位的调制量,并且有较好的反射强度,如图 8 所示。

3.3 边缘场效应

对于本文结构模型,主要研究液晶分子偏转、相位调制以及电场分布的情况,TechWiz LCD 是为液晶而设计的 3D 模拟软件。在实验中使用 E7 液晶材料,其相关参数为液晶分子展曲形变系数 $K_{11} = 11.7$ pN、扭曲形变系数 $K_{22} = 8.8$ pN、弯曲形变系数 $K_{33} = 19.5$ pN、介电常数指向矢平行分量 $\epsilon_{\parallel} =$

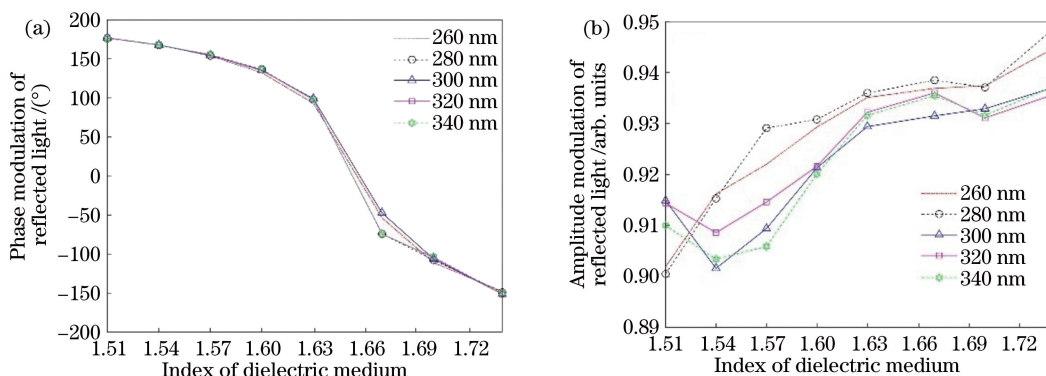


图 7 不同像素间隙的影响。(a)反射光的相位调制变化;(b)反射光的强度变化
Fig. 7 Influences of different pixel gaps. (a) Phase modulation variation of reflected light;
(b) amplitude variation of reflected light

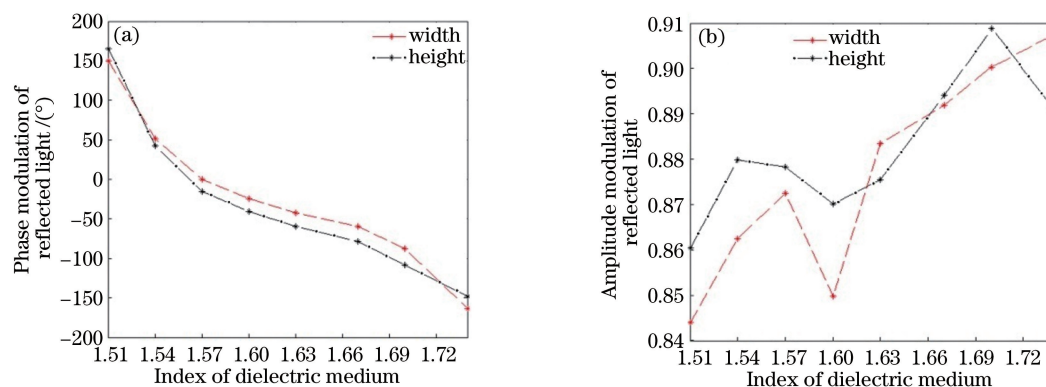


图 8 光栅高度和宽度的影响。(a)反射光的相位调制变化;(b)反射光的强度变化
Fig. 8 Influences of grating height and width. (a) Phase modulation variation of reflected light;
(b) amplitude variation of reflected light

19.5、指向矢垂直分量 $\epsilon_{\perp} = 5.1$ 、寻常光的折射率 $n_e = 1.7429$ 、非寻常光的折射率 $n_o = 1.5198$ 。

当给非目标像素施加一个低于阈值电压的 1 V 初始电压,液晶预倾角为 2° 时,相位调制器件的性能可以达到最佳。在 TechWiz 仿真实验中,中间目

标像素 (pixel B) 电压为 3.5 V,非目标像素 (pixel A、pixel C) 电压为 0 V,像素间隙的大小分别为 260, 280, 300, 320, 340 nm,液晶层厚度为 600 nm。Al 电极的高度设置为 50 nm,通过仿真软件得出液晶的指向矢分布和电场分布,如图 9 所示。通过改

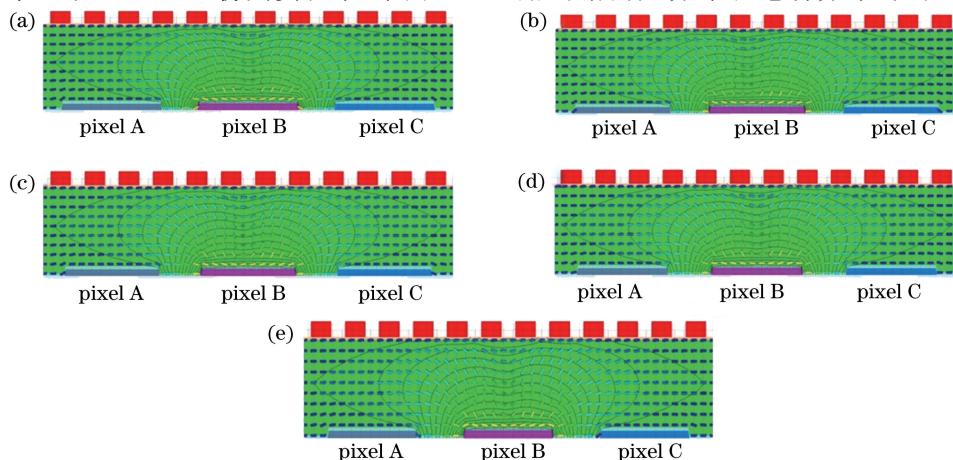


图 9 不同像素间隙下的指向矢分布和电场分布。(a) 260 nm;(b) 280 nm;(c) 300 nm;(d) 320 nm;(e) 340 nm
Fig. 9 Distributions of direction vector and electric field under different pixel gaps. (a) 260 nm;
(b) 280 nm; (c) 300 nm; (d) 320 nm; (e) 340 nm

变像素间隙的大小,可以观察到随着像素间隙的增大,液晶的指向矢分布和电场分布并无明显变化,即性能具有稳健性。

4 结构加工和测试

4.1 结构加工

经过前期实验仿真,得到如表 1 所示的最佳结构参数。GLCoS 的制作借助成熟的 LCoS 器件工艺,由于器件模型参数与传统器件相比有较大差异,因此在制备流程中需对工艺洁净度、操作规范等工艺参数要严格控制。

表 1 GLCoS 结构的参数

Table 1 Parameters of GLCoS structure

Parameter	Value /nm
Grating length l	150
Grating height h	100
Grating period d	250
Liquid crystal layer t	600
Al electrode e	50

为形成亚波长光栅结构,首先通过电子束光刻在 ITO 玻璃基板上图案化金 (Au) 光栅,使用薄

(10 nm)Ti 层来增加 Au 和 ITO 之间的黏附力;下玻璃基板上溅射一层与其面积相等、厚度为 50 nm 的铝电极,在铝层上面涂覆 700 nm 的 SiO_2 进行封框。然后灌装液晶,实验中需要通过摩擦使液晶分子的取向完全一致,使用旋涂光控取向剂 SD1。首先,在 800 r/min 的转速下旋涂 5~10 s,使溶液均匀铺开;然后在 3000 r/min 的转速下旋涂 5 min,为了能有足够薄的取向层厚度,可适当降低 SD1 浓度,增加转速;将旋涂后的基板置于控温热台上,进行退火,退火的温度为 100 $^{\circ}\text{C}$,时间为 10~12 min;最后液晶灌装完成后,在封框的外侧进行涂胶布线,粘贴上、下玻璃基板。制造的器件结构和局部光栅的扫描电子显微镜 (SEM) 图像分别如图 10(a) 和 (b) 所示。从图 10(b) 可以看出,所设计的光栅结构具有良好的均匀性。

4.2 相位调制性能测试

采用迈克耳孙干涉原理搭建的测试平台系统如图 11 所示,用 GLCoS 代替干涉仪的一个反射镜。实验选用 532 nm 的半导体激光,经扩束准直后得到平行光,再经偏振分光棱镜后分为两路,一部分作为参考光经反射镜反射至 CCD,另一部分光经

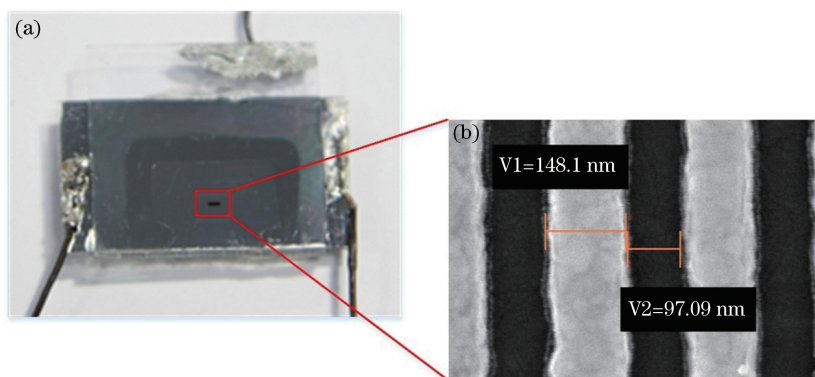


图 10 器件结构。(a) 器件示意图;(b) 局部光栅 SEM 图像

Fig. 10 Device structure. (a) Schematic of device; (b) local grating SEM image

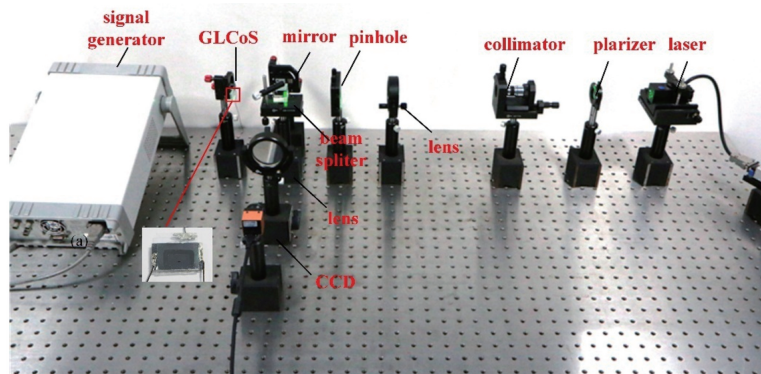


图 11 实验装置图

Fig. 11 Schematic of experimental setup

GLCoS 后反射, 两束光经叠加后形成干涉条纹。GLCoS 由信号发生器外施加不同的电压驱动。

实验中, 保持器件右边的电压值为 0 V, 左边电压值从 1.2 V 递增到 5.0 V, 步长为 0.2。CCD 采集其中电压为 0 V 和 2.5 V 的干涉条纹如

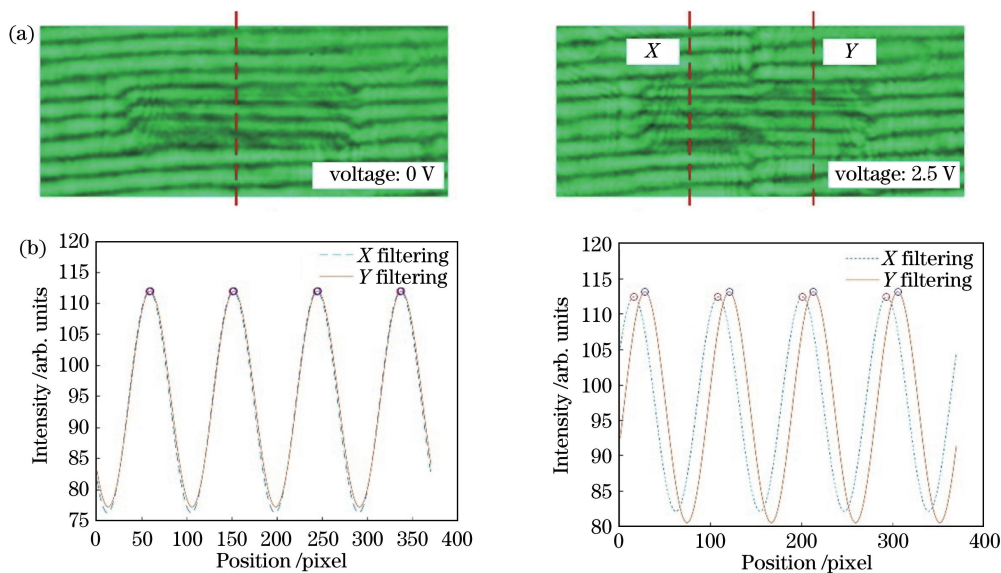


图 12 处理结果。(a)干涉条纹图;(b)滤波结果图

Fig. 12 Results of processing. (a) Interferometric fringes; (b) results of filtering

对原始图像进行处理, 滤去高频噪声, 得到图 12(b), 从图中可以清楚地观察到条纹的相对移动。在计算相位偏移量时, 为了减小误差, 可采用平均周期及平均偏移量的方法。计算公式为

$$P_{\text{phase}} = \frac{|X - Y|}{\bar{P}} \times 2\pi, \quad (5)$$

式中: \bar{P} 为滤波后干涉条纹的平均周期; $|X - Y|$ 为滤波后在 2π 周期内条纹差值平均值。

如图 13(a)所示, GLCoS 结构的相位随驱动电压

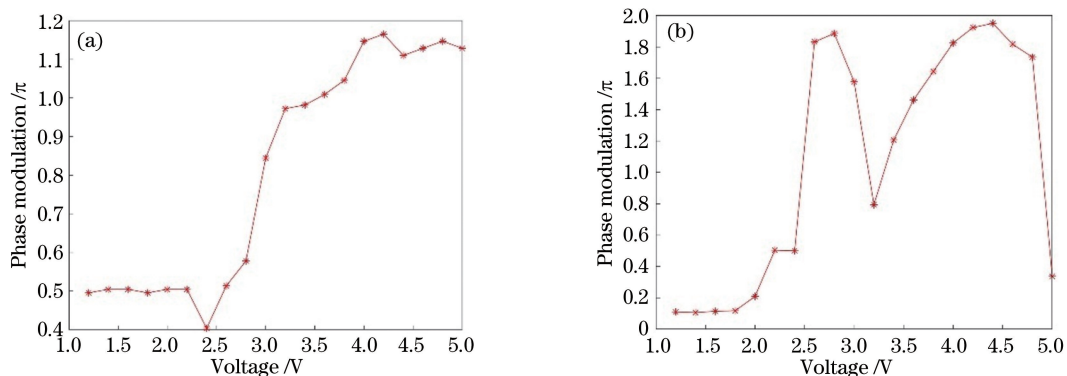


图 13 反射相位随电压变化。(a)微纳结构部分;(b)液晶部分

Fig. 13 Reflection phase as a function of voltage. (a) Micro-nano structure part; (b) liquid-crystal part

5 结 论

为实现有源 $0 \sim 2\pi$ 相位调制的目的, 提出一种

图 12(a)所示, 可以很清楚地看到中间部分的微纳结构, 由相变引起的条纹位移明显, 但是边缘的偏移有些模糊。造成这一现象的可能原因是在驱动模式中, 施加的电压在中线处突然发生变化, 但由于液晶分子间的作用力, 相变并不剧烈。

的改变呈现非线性变化趋势, 但总体上是递增的, 调制的最大相位值接近 1.2π 。对于相变的测量, 由于制备的器件结构表面不是很平坦, 测量非常困难。但是由于采样面积很小, 因此相移可以看作是均匀的。图 13(b)为纯液晶部分的相位变化, 区别于光栅微纳部分的相位结果, 这意味着基于 FP 共振的 GLCoS 结构可以实现相位调制。需要说明的是, 相位调制量尚未达到预期的效果, 主要原因在于电子刻蚀和装配的超净环节衔接不当, 使得介质波导的高度 t 远超出设计值。

Au 亚波长光栅、薄液晶盒、铝电极组成的复合共振波导结构, 用于构建硅基液晶器件模型。模型通过施加电压改变液晶的折射率, 进而控制该结构开腔

FP 的边缘介质条件,进而实现相位调制。基于商业软件建立仿真平台,理论、数值仿真结果表明该结构可实现在可见光内宽带、 $1\ \mu\text{m}$ 像素量级的有源相位调制,为高空间带宽积的有源空间光调制器提供了一条技术路线,期望应用于全息视频显示中。

本文采用液晶作为介质,具有高双折射率和低电压控制的优势,进一步说,该设计在材料和装配上可与现在已经商用的 LCoS 接轨,便于器件的实用化。

下一步,将优化这种简单、通用、高效率的结构,实现亚波长光栅可调光学相位器件,期望它能在高空间带宽积的全息视频显示及其他集成光学技术中发挥实用价值。

参 考 文 献

- [1] Memmolo P, Bianco V, Merola F, et al. Breakthroughs in photonics 2013: holographic imaging[J]. IEEE Photonics Journal, 2014, 6(2): 0701106.
- [2] Shen C. Research on system and device for LCoS-based holographic video display[D]. Hefei: Anhui University, 2015.
沈川. 基于硅基液晶的全息视频显示系统与器件研究[D]. 合肥: 安徽大学, 2015.
- [3] Qaderi K, Smalley D E. Leaky-mode waveguide modulators with high deflection angle for use in holographic video displays [J]. Optics Express, 2016, 24(18): 20831-20841.
- [4] Lalanne P, Yan W, Vynck K, et al. Light interaction with photonic and plasmonic resonances [J]. Laser & Photonics Reviews, 2018, 12(5): 1700113.
- [5] Genevet P, Capasso F, Aieta F, et al. Recent advances in planar optics: from plasmonic to dielectric metasurfaces[J]. Optica, 2017, 4(1): 139-152.
- [6] Chen Y, Tian Y N, He L, et al. Research on subwavelength metal grating/dielectric/metal hybrid waveguide sensing structure [J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(1): 0110001.
陈颖, 田亚宁, 何磊, 等. 亚波长金属光栅/电介质/金属混合波导传感结构的研究 [J]. 中国激光, 2018, 45(1): 0110001.
- [7] Quaranta G, Basset G, Martin O J F, et al. Recent advances in resonant waveguide gratings [J]. Laser & Photonics Reviews, 2018, 12(9): 1800017.
- [8] Collin S, Pardo F, Teissier R, et al. Horizontal and vertical surface resonances in transmission metallic gratings [J]. Journal of Optics A: Pure and Applied Optics, 2002, 4(5): S154-S160.
- [9] Anwar R S, Ning H S, Mao L F. Recent advancements in surface plasmon polaritons-plasmonics in subwavelength structures in microwave and terahertz regimes [J]. Digital Communications and Networks, 2018, 4(4): 244-257.
- [10] Kraft M, Luo Y, Maier S A, et al. Designing plasmonic gratings with transformation optics [J]. Physical Review X, 2015, 5(3): 031029.
- [11] Huang C P, Chan C T. Deep subwavelength Fabry-Perot resonances [J]. EPJ Applied Metamaterials, 2014, 1: 2.
- [12] Huang C P, Yin X G, Zhang Y, et al. Deep subwavelength Fabry-Perot-like resonances in a sandwiched reflection grating [J]. Physical Review B, 2012, 85(23): 235410.
- [13] Zhang M H, Shen C, Zhu W L, et al. Fabry-Perot resonance on aluminum sub-wavelength gratings for holographic display device [J]. Chinese Journal of Electron Devices, 2018, 41(4): 833-838.
张明华, 沈川, 朱文亮, 等. 面向全息视频显示的深亚波长光栅耦合结构 [J]. 电子器件, 2018, 41(4): 833-838.
- [14] Zhu W L, Shen C, Zhang M H, et al. Architectural design of deep metallic sub-wavelength grating for practical holography display [J]. Proceedings of SPIE, 2017, 10460: 104601E.
- [15] Hu H T, Wang G Z, Wei S, et al. Liquid crystal phase modulator based on deep sub-grating structure [J]. Proceedings of SPIE, 2018, 10845: 108450F.
- [16] Zhang J Q, Kosugi Y, Otomo A, et al. Electrical tuning of metal-insulator-metal metasurface with electro-optic polymer [J]. Applied Physics Letters, 2018, 113(23): 231102.
- [17] Lochbihler H, Depine R. Highly conducting wire gratings in the resonance region [J]. Applied Optics, 1993, 32(19): 3459-3465.
- [18] Huang C P, Wang S B, Yin X G, et al. Enhanced electromagnetic pressure in a sandwiched reflection grating [J]. Physical Review B, 2012, 86(8): 085446.
- [19] Lalanne P, Lemerrier-Lalanne D. On the effective medium theory of subwavelength periodic structures [J]. Journal of Modern Optics, 1996, 43(10): 2063-2085.
- [20] Sheng P, Stepleman R S, Sanda P N. Exact eigenfunctions for square-wave gratings: application to diffraction and surface-plasmon calculations [J]. Physical Review B, 1982, 26(6): 2907-2916.
- [21] Porto J A, García-Vidal F J, Pendry J B. Transmission resonances on metallic gratings with very narrow slits [J]. Physical Review Letters, 1999, 83(14): 2845-2848.
- [22] Polyakov A, Zolotarev M, Schuck P J, et al. Collective behavior of impedance matched plasmonic nanocavities [J]. Optics Express, 2012, 20(7): 7685-7693.