

## 非均匀分布的纳米银掺杂的聚合物 分散液晶全息光栅等效电路建模

刘悠嵘, 郑继红\*, 桂坤, 王康妮, 庄松林  
(上海理工大学 光电信息与计算机工程学院, 上海 200093)

**摘要:** 聚合物分散液晶全息光栅具有电场可调的特点, 材料中掺杂纳米银颗粒, 能够有效降低光栅的驱动电压. 由于聚合动力学的影响, 会造成纳米银颗粒在光栅中的非均匀分布, 即纳米银在聚合物和液晶区分布含量不均匀, 表现出不同的电场调控特性. 通过等效电路建模的方法研究驱动电压阈值与所施加交流电场的频率之间的关系. 根据 Maxwell-Wagner 效应建立纳米银分别被液晶和聚合物包围的等效电路模型, 具体研究在液晶条纹中, 纳米银含量占总纳米银比例不同的条件下, 纳米银掺杂的聚合物分散液晶全息光栅的介电弛豫时间和弛豫振荡的频率数值变化, 进一步调节驱动电场频率, 获得更低的驱动电压阈值. 通过最优驱动电场频率范围来初步确定纳米银在光栅中的分布结构, 并证明纳米银颗粒集中在液晶条纹, 少量分布在聚合物条纹中.

**关键词:** 聚合物分散液晶全息光栅; 弛豫振荡频率; 阈值驱动电压; 非均匀分布  
**中图分类号:** O438.1 **文献标识码:** A

## Equivalent circuit modeling of non-uniformly distributed nano Ag doped Holographic polymer dispersed Liquid Crystal Grating

LIU You-Rong, ZHENG Ji-Hong\*, GUI Kun, WANG Kang-Ni, ZHUANG Song-Lin  
(University of Shanghai for Science and Technology, School of Optical-Electrical and Computer Engineering, Shanghai 200093, China)

**Abstract:** The diffraction efficiency of the holographic polymer-dispersed liquid crystal (H-PDLC) grating can be adjusted by the applied electrical field. Doping Ag nanoparticles (NPs) can effectively reduce the driving voltage of the grating. Due to the influence of polymerization kinetics, Ag NPs are distributed unevenly in the grating, namely, the distribution of Ag NPs in the polymer and LC area is not uniform and exhibit different electric field control characteristics. The relationship between the threshold driving voltage and the frequency of the applied field can be studied by equivalent circuit model. According to Wagner-Maxwell effect, in this paper, the equivalent circuit model of Ag NPs surrounded by LC and polymer, respectively, was established. Under the condition of different concentration of Ag NPs within the LC area, the relaxation time and relaxation frequency of Ag NPs doped H-PDLC grating was studied. The low driving voltage can be further obtained by adjusting the frequency of applied electric field. The distribution of Ag NPs in the grating can be determined by the optimum driving electric field frequency range, and it is confirmed that the Ag NPs are concentrated in the LC strip and distributed in a small amount in the polymer stripes.

**Key words:** holographic polymer dispersed liquid crystal, relaxation oscillation frequency, threshold driving voltage, non-uniform distribution

**PACS:** 61.30.Pq, 61.30.Gd, 61.43.Bn, 62.25.-g

收稿日期: 2017-01-19, 修回日期: 2017-02-21

Received date: 2017-01-19, revised date: 2017-02-21

基金项目: 上海市重点学科项目第三期(S30502)、国家重大科学仪器设备开发专项资助课题(2012YQ15008720)

**Foundation items:** Supported by the Shanghai Key Subject Construction funding (s30502); National Key Scientific Instrument Development Projects (2012YQ15008720)

作者简介 (**Biography**): 刘悠嵘 (1993-), 男, 安徽安庆人, 硕士生, 主要研究领域为聚合物分散液晶光栅. E-mail: yourongliu@sina.com

\* 通讯作者 (**Corresponding author**): E-mail: jihongzheng@sina.com

## 引言

全息聚合物分散液晶 (Holographic polymer dispersed liquid crystal, 缩写为 H-PDLC) 光栅具有高衍射效率、可电场开关、快速响应、各向异性等特性<sup>[1-2]</sup>, 可广泛应用于光通信、平面显示、光信息储存以及集成光学等领域. 但是, H-PDLC 光栅通常需要较高的驱动电压, 限制了其广泛应用的潜力. 为了降低 H-PDLC 器件的驱动电压, 有研究报道直接通过向聚合物中添加导电性的粒子, 基本条件是需要加入聚合物中的粒子足够小、足够透明、不会大量反射或吸收入射光. 最近, 研究报道表明在 H-PDLC 光栅中添加纳米银粒子, 由于存在局域表面等离子共振的特性, 可以有效降低驱动电压<sup>[3]</sup>. 通常, 聚合物分散液晶全息光栅在曝光后, 会形成富含聚合物区和富含液晶区的干涉明暗条纹. 在掺杂纳米银粒子的聚合物分散液晶体系中, 在曝光前, 纳米银颗粒均匀分布在材料中. 但是, 全息干涉曝光时, 在 H-PDLC 体系亮条纹的区域, 单体发生自由基光聚合使该区域单体的浓度减小, 浓度梯度的变化导致暗条纹处的单体向亮条纹扩散, 同时液晶反方向扩散到暗条纹区域<sup>[4]</sup>, 以减少化学潜在的差异, 因为液晶是不消耗在明亮的区域<sup>[5]</sup>, 导致单体耗尽时聚合的产物和液晶的空间周期分布的形成<sup>[6]</sup>. 大量研究表明, 纳米银颗粒也会在形成光栅过程中扩散<sup>[7-8]</sup>, 这种形态的变化来自聚合和添加纳米银粒子时相分离动力学之间平衡的差异即聚合动力学影响<sup>[9-10]</sup>. 但大量参考文献研究的是纳米银颗粒在光致聚合物介质中扩散过程<sup>[11-12]</sup>, H-PDLC 光栅中纳米银颗粒的扩散尚未研究, 因此为了探讨纳米银在聚合物分散液晶光栅中的分布情况, 本文采用理论分析的方法探讨纳米银主要分布在液晶 (暗条纹) 中还是聚合物 (亮条纹) 中.

我们研究过当纳米银颗粒进入 H-PDLC 光栅中, 有外加电场存在下, 纳米银均匀分布情况下, 与聚合物和液晶之间产生 Maxwell-Wagner 效应, 即聚合物和液晶与纳米银之间的界面弛豫振荡过程<sup>[13]</sup>. 在此基础上, 本文通过等效电路的建模分析, 研究在液晶条纹中, 纳米银掺杂占比不同条件下 (如 10 ~ 100%), 不同驱动电压频率与驱动电压阈值之间关系. 三种掺入不同浓度纳米银的 H-PDLC 光栅中, 在相分离富聚合物或液晶区建立了等效回路模型, 依据 Maxwell-Wagner 效应, 研究了聚合物或液晶和纳米银之间的界面弛豫振荡过程, 并且通过计算得出

了界面弛豫振荡频率, 且依据 Debye 理论分析了聚合物或液晶和纳米银界面弛豫振荡频率会影响阈值电压. 同时模拟出整个系统在外界电场条件下, 纳米银在聚合物分散液晶光栅分布的变化下外加频率对阈值电压的影响, 通过实验测得影响 H-PDLC 光栅的最优驱动电场频率范围, 通过对比模拟结果, 来初步确定液晶条纹中纳米银结构分布情况, 并证明 H-PDLC 光栅中纳米银颗粒会集中在液晶条纹中的猜想.

## 1 基本原理

图 1 (a) 为纳米银分布在 PDLC 材料中, 图 1 (b) 为 H-PDLC 光栅内聚合物 (亮条纹) 与液晶 (暗条纹) 分布, 但无法确定纳米银颗粒的分布. 图 2 (a) 所示未曝光的 PDLC 分布示意图, 其中聚合物, 液晶, 纳米银分布在材料中. 曝光后 H-PDLC 光栅材料微纳结构示意图, 其中图 2 (b) 为纳米银颗粒集中在聚合物条纹中, 图 2 (c) 为纳米银颗粒均匀分布在液晶与聚合物条纹中, 图 2 (d) 为纳米银颗粒集中在液晶条纹中. 图 2 (b)、(c)、(d) 中表示不同分布的纳米银掺杂的聚合物分散液晶全息光栅, 即纳米银在聚合物和液晶区分布含量变化, 会表现出不同的电场调控特性.

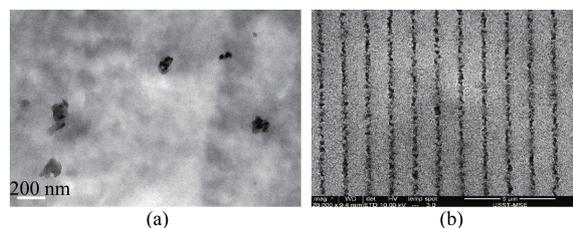


图 1 掺杂纳米银的聚合物分散液晶 (a) TEM 图, (b) 光栅 SEM 图

Fig. 1 Polymer dispersed liquid crystals doped with nano Ag (a) TEM diagram, (b) SEM diagram of grating

为了确定以上某种分布, 可以从掺杂纳米银的 H-PDLC 光栅的电光特性上研究, 因为掺杂纳米银的 H-PDLC 光栅会发生 Maxwell-Wagner 效应. Maxwell-Wagner 效应是发生在非均匀材料中的弛豫, 对于光栅中聚合物与液晶有着不同的介电常数与电导率, 当有外加电压加到光栅上时, 在聚合物与纳米银和液晶与纳米银的界面处会发生 Maxwell-Wagner 效应 (由于在形成光栅过程中, 液晶和聚合物相分离, 因此他们之间弛豫过程很弱, 可以忽略), 所以可以建立等效电路模型<sup>[14]</sup>. 聚合物分散液晶光栅的驱动阈值电压有公式表示为<sup>[15]</sup>:

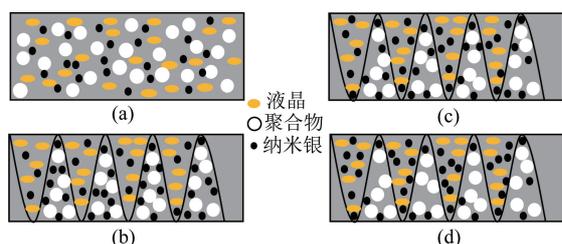


图 2 掺杂纳米银的聚合物分散液晶 (a) 纳米银颗粒的随机分布, (b) 纳米银颗粒集中在聚合物条纹, (c) 纳米银颗粒均匀分布明暗条纹, (d) 纳米银颗粒集中在液晶条纹

Fig. 2 Polymer dispersed liquid crystal doped with nano Ag. (a) Random distribution of Ag nanoparticles, (b) Ag nanoparticles are concentrated in the polymer stripes, (c) Ag nanoparticles are evenly distributed in light-dark stripes, (d) Ag nanoparticles are concentrated in the liquid crystal stripes

$$V_c = \frac{d_0}{3a} \left( \frac{\sigma_1}{\sigma_2} + 2 \right) \left( \frac{K(l^2 - 1)^2}{\Delta \varepsilon} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (1)$$

其中  $\sigma_1$  为掺杂纳米银的液晶的电导率,  $\sigma_2$  为聚合物的电导率,  $d_0$  为光栅的厚度,  $a$  为液晶微滴的长轴长度,  $l$  为液晶微滴长半轴与短半轴之比,  $K$  为弹性常数,  $\Delta \varepsilon$  为介电各向异性值. 在低频时, 驱动阈值电压是与电导有关, 在高频时, 驱动阈值电压是与电容有关, 所以式(1)可转化为:

$$V_c = \frac{d_0}{3a} \left( \frac{C}{C'} + 2 \right) \left( \frac{K(l^2 - 1)^2}{\Delta \varepsilon} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (2)$$

$C, C'$  分别为液晶和聚合物的等效电容, 所以可通过等效电路模型中的等效电容来求出光栅的阈值电压, 研究光栅的电光特性.

## 2 模型建立

在制作 H-PDLC 的干涉过程中, 液晶和聚合物随着干涉光强的分布呈现余弦分布干涉图样, 在亮条纹分布的是聚合物, 暗条纹分布的是液晶, 而纳米银颗粒会分布在两者中. 假设在干涉过程中, 液晶和聚合物彻底相分离, 我们就可以建立如下模型: 将 H-PDLC 光栅中的液晶介质和聚合物介质等效为一个个小的立方体, 而纳米银粒子也等效为一个个更小的立方体, 且被包含在液晶和聚合物中, 如图 3 所示, 由于液晶和聚合物的材料不同和纳米银分布不均匀, 就会造成液晶和聚合物等效立方体的长度不同, 其分别立方体长度的计算公式如下 (同时也模拟纳米银全部在液晶中分布的特殊情况, 即聚合物无等效立方体长度, 作为比较). 依含量百分比的意义, 可得如下公式:

$$W\% = \frac{(N_1 + N_2)\rho_M V}{(\rho_p V_p + \rho_{LC} V_{LC}) + (N_1 + N_2)\rho_M V}, \quad (3)$$

其中,  $W\%$  为纳米银粒子的含量百分比,  $N_1$  为纳米银粒子在聚合物介质中的数目,  $N_2$  为纳米银粒子在液晶介质中的数目,  $v$  为纳米银粒子的体积,  $V_p$  为光栅中聚合物的体积,  $V_{LC}$  为光栅中液晶的体积,  $\rho_M$  为纳米银粒子的密度,  $\rho_p$  为聚合物的密度,  $\rho_{LC}$  为液晶的密度.

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{1-n}{n}, \quad (4)$$

其中,  $n$  为液晶中纳米银含量占总体纳米银的百分比 ( $n \neq 100\%$ ).

$$V_p = L_p^3 N_1, V_{LC} = L_{LC}^3 N_2, v = a^3, \quad (5)$$

其中,  $L_p, L_{LC}, a$  分别为聚合物、液晶、纳米银等效立方体的平均边长.

由式(3)、(4)得:

$$\frac{1}{N_1 v} = \frac{\rho_M}{1-n} \times \frac{1-W\%}{W\%} \times \frac{1}{\rho_p V_p + \rho_{LC} V_{LC}}, \quad (6)$$

由式(5)可得:

$$\frac{L_p}{a} = \sqrt[3]{\frac{V_p}{N_1 v}}, \frac{L_{LC}}{a} = \sqrt[3]{\frac{V_{LC}}{N_2 v}}, \quad (7)$$

根据式(6)、(7)可得出:

$$\frac{L_p}{a} = \sqrt[3]{\frac{\rho_M}{1-n} \times \frac{1-W\%}{W\%} \times \frac{V_p}{\rho_p V_p + \rho_{LC} V_{LC}}}, \quad (8)$$

$$\text{其中 } \frac{V_p}{V_{LC}} = \frac{M_p \rho_{LC}}{M_{LC} \rho_p}. \quad (9)$$

$M_p$  为聚合物的质量,  $M_{LC}$  为液晶的质量. 将式(9)代入式(8)可得:

$$\frac{L_p}{a} = \sqrt[3]{\frac{\rho_M}{1-n} \times \frac{1-W\%}{W\%} \times \frac{1}{\rho_p \left( 1 + \frac{M_{LC}}{M_p} \right)}}, \quad (10)$$

同理可得:

$$\frac{L_{LC}}{a} = \sqrt[3]{\frac{\rho_M}{n} \times \frac{1-W\%}{W\%} \times \frac{1}{\rho_{LC} \left( 1 + \frac{M_p}{M_{LC}} \right)}}. \quad (11)$$

这样通过此式可计算出液晶与聚合物及纳米银的平均边长. 同理当纳米银全部在液晶区域内 ( $n = 100\%$ ) 特殊情况时, 即聚合物无纳米银, 没有等效电路模型与等效平均边长  $L_p$ , 而液晶等效平均边长为:

$$\frac{L_{LC}}{a} = \sqrt[3]{\rho_M \times \frac{1-W\%}{W\%} \times \frac{1}{\rho_{LC} \left( 1 + \frac{M_p}{M_{LC}} \right)}}. \quad (12)$$

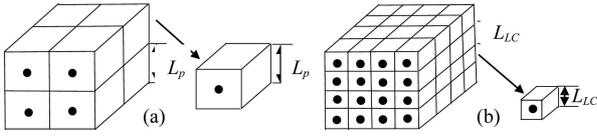


图3 等效立方体(a)聚合物,(b)液晶  
Fig.3 Equivalent cube (a) polymer,(b) liquid crystal

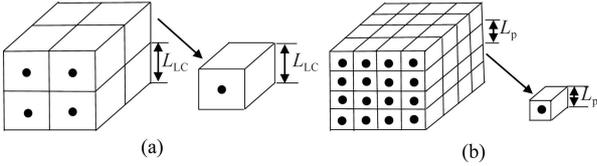


图4 等效立方体(a)液晶,(b)聚合物  
Fig.4 Equivalent cube (a) liquid crystal,(b) polymer

图3为当液晶条纹中纳米银颗粒含量为 $50\% \leq n < 100\%$ ,大立方体代表聚合物的长度,小立方体代表液晶的长度.图4为当 $n < 50\%$ ,大立方体就代表液晶,小立方体代表聚合物.当 $n = 100\%$ ,只有液晶的等效立方体.黑色的点代表纳米颗粒,每一个包含纳米银颗粒立方体可以等效为一个图5的等效电路模型.

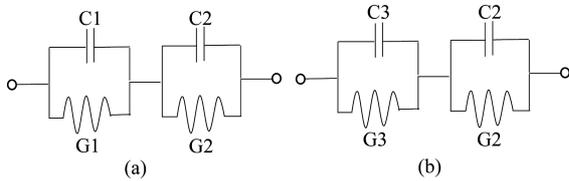


图5 等效电路(a)液晶与纳米银,(b)聚合物与纳米银  
Fig.5 Equivalent circuit:(a) liquid crystal and nano Ag,  
(b) polymer and nano Ag

$G_1, G_2, G_3$  和  $C_1, C_2, C_3$  分别为液晶、纳米银、聚合物的电导和电容,得下式:

$$G_1 = \sigma_1(L_{LC}^2/L_p), C_1 = \varepsilon_1(L_{LC}^2/L_p), \quad (13)$$

$$G_2 = \sigma_2(a^2/a), C_2 = \varepsilon_2(a^2/a), \quad (14)$$

$$G_3 = \sigma_3(L_p^2/L_p), C_3 = \varepsilon_3(L_p^2/L_p), \quad (15)$$

$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  和  $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$  分别为液晶、纳米银、聚合物的电导率和介电常数.根据电路模型,知道液晶和纳米银的串联等效电路总导纳为:

$$Y_1 = \frac{(G_1 + j\omega C_1)(G_2 + j\omega C_2)}{(G_1 + G_2) + j\omega(C_1 + C_2)}. \quad (16)$$

聚合物和纳米银的串联等效电路总导纳为:

$$Y_2 = \frac{(G_3 + j\omega C_3)(G_2 + j\omega C_2)}{(G_2 + G_3) + j\omega(C_3 + C_2)}, \quad (17)$$

上式  $Y_1, Y_2$  的虚部分别是  $\omega C, \omega C'$  且通过计算

$$C = \frac{(G_1 + G_2)(C_1 G_2 + C_2 G_1) - (C_1 G_2 - \omega^2 C_1 C_2)(C_1 + C_2)}{(G_1 + G_2)^2 + \omega^2(C_1 + C_2)^2}, \quad (18)$$

$$C' = \frac{(G_3 + G_2)(C_3 G_2 + C_2 G_3) - (C_3 G_2 - \omega^2 C_3 C_2)(C_3 + C_2)}{(G_3 + G_2)^2 + \omega^2(C_3 + C_2)^2}. \quad (19)$$

且  $C$  服从德拜频率分布,可得:

$$C(\omega) = C(\infty) + \frac{C(0) - C(\infty)}{1 + \omega^2 \tau_1^2}, \quad (20)$$

$$\tau_1 = \frac{C_1 + C_2}{G_1 + G_2}, \quad (21)$$

$$C(\infty) = \frac{C_1 C_2}{G_1 + G_2}, \quad (22)$$

$$C(0) = \frac{(G_1 + G_2)(C_1 G_2 + C_2 G_1) - G_1 G_2(C_1 - C_2)}{(G_1 + G_2)^2}, \quad (23)$$

$$C(0) - C(\infty) + \frac{(C_1 G_2 - C_2 G_1)^2}{(G_1 + G_2)^2(C_1 + C_2)}, \quad (24)$$

且  $C'$  也服从德拜频率分布,可得:

$$C'(\omega) = C'(\infty) + \frac{C'(0) - C'(\infty)}{1 + \omega^2 \tau_1^2}, \quad (25)$$

$$\tau_2 = \frac{C_3 + C_2}{G_3 + G_2}, \quad (26)$$

$$C'(\infty) = \frac{C_3 + C_2}{G_3 + G_2}, \quad (27)$$

$$C'(0) = \frac{(G_3 + G_2)(C_3 G_2 + C_2 G_3) - G_3 G_2(C_3 + C_2)}{(G_3 + G_2)^2}, \quad (28)$$

$$C'(0) - C'(\infty) = \frac{(C_3 G_2 - C_2 G_3)^2}{(G_3 + G_2)^2(C_3 + C_2)}. \quad (29)$$

液晶和纳米银颗粒之间形成的弛豫振荡时间为  $\tau_1$ , 聚合物和纳米银颗粒之间形成的弛豫振荡时间为  $\tau_2$ .

图示6为当液晶条纹中纳米银颗粒含量为 $50\% < n < 100\%$ 时的等效电路图中,小正方形代表着液晶与纳米银的等效电路,大正方形代表着聚合物与纳米银的等效电路.同样当 $n < 50\%$ ,等效电路图类似,不同是大正方形代表着液晶与纳米银的等效电路,小正方形代表着聚合物与纳米银的等效电路.当 $n = 100\%$ ,纳米银颗粒全部在液晶区,聚合物内无纳米银,即聚合物中无等效电路,聚合物的电导

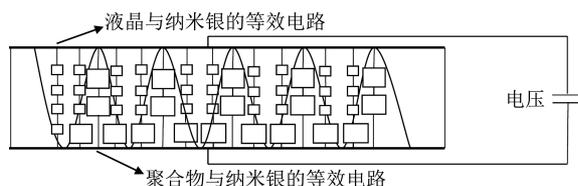


图6 液晶与纳米银和聚合物与纳米银的等效电路图  
Fig.6 Equivalent circuit diagram of liquid crystal and nano Ag (small squares), and polymer and nano Ag (large squares)

是恒定常数,只需计算液晶区域的等效电路模型.根据以上公式与等效电路模型,编写程序进行模拟仿真.

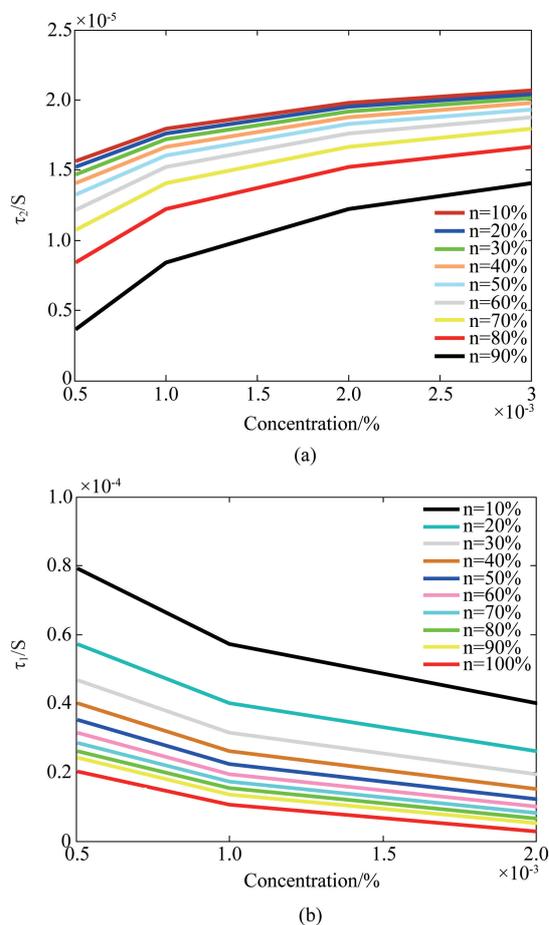


图7 弛豫振荡时间与掺杂纳米银的浓度关系(a)聚合物和纳米银,(b)液晶和纳米银  
Fig.7 Relationship between relaxation oscillation time and doping nano Ag concentration: (a) polymer and nano Ag, (b) liquid crystal and nano Ag

### 3 模拟仿真结果

根据 Debye 理论,当频率  $\omega$  小于  $1/\tau$  时,外电场就会影响介质表面的弛豫振荡,进而影响阈值电压,

而  $\omega$  大于  $1/\tau$  时,外电场几乎不会影响粒子之间的弛豫振荡.因此,当外加电场频率小于聚合物或液晶与纳米银界面弛豫振荡时间的倒数,则电场将对液晶和纳米银以及聚合物和纳米银之间的弛豫振荡有影响,导致阈值电压减小.当频率不断增加到高于两种弛豫振荡频率之一时,外电场对其中一种弛豫振荡减弱,从而增加了阈值电压.

由推导的公式,通过 matlab 编程软件模拟,可得仿真结果图形.从上图 7 可以看出掺入纳米银的浓度与纳米银在光栅中的分布会影响着弛豫振荡时间.掺入纳米银的浓度不同使聚合物与液晶区域内弛豫振荡时间改变,就会改变外加电场的频率影响值.其中液晶条纹中,纳米银含量占总体纳米银比例增大,即纳米银在光栅中的分布变化时,聚合物与液晶区域内弛豫振荡时间都在减小,导致影响弛豫振荡的外加电场频率也会随之增大.我们选定三种掺入纳米银的浓度,即 0.05%、0.1%、0.2%,模拟出液晶中纳米银含量占总体纳米银比例与电容之间的变化关系图.由式(2)可以得出阈值电压是  $C/C'$  与成正比(其他参数一定时),所以从模拟图可以看出阈值电压与频率之间的关系.

图 8 中的曲线转折点为当施加点对应的外加电场频率时,光栅可以获得最低阈值电压.纳米银在聚合物分散液晶光栅中聚合物区和液晶区分布情况会影响最低阈值电压驱动频率,液晶中纳米银含量相对于光栅中纳米银含量的比例增大时,在曲线转折点对应的外加电场频率也在增大.对于不同纳米银掺杂浓度(0.05%、0.1%、0.2%)的光栅,均符合以上的规律.为了验证掺杂纳米银的光栅随外加电场频率的变化规律,通过实验中可以测得最低阈值电压所对应的外加调制频率.

### 4 电光特性实验

实验制备了掺杂三种浓度(0.05%、0.1%、0.2%)纳米银颗粒的 PDLC 材料,然后将材料暴露于 532 nm 激光干涉场,时间 80 ~ 120 s,该过程导致具有光栅周期的 H-PDLC 光栅的形成.再将具有变化频率的外加电场施加于 H-PDLC 光栅上,测得衍射和透射的数值,通过计算,得出以下实验图如归一化衍射效率随外加电场频率的增加而变化.

在图 9,掺杂 0.05% 纳米银浓度的 H-PDLC 光栅电光特性曲线中可以看出,外加电场频率为 5 kHz 和 10 kHz,衍射效率降至 80% 时,可以获得大约最低的阈值电压,如图所示红黑两条曲线.所以在

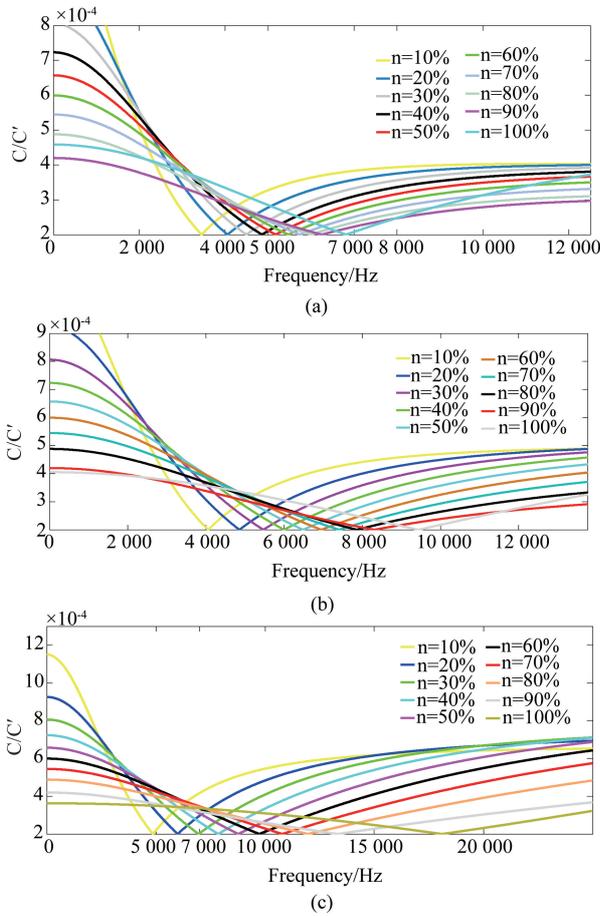


图8 外加电场频率与电容的关系,掺杂(a)0.05%浓度纳米银, (b)0.1%浓度纳米银, (c)0.2%浓度纳米银  
 Fig. 8 Relationship between frequency of external electric field and capacitance: (a) doped with 0.05% concentration of nano Ag, (b) doped with 0.1% concentration of nano Ag, (c) doped with 0.2% concentration of nano Ag

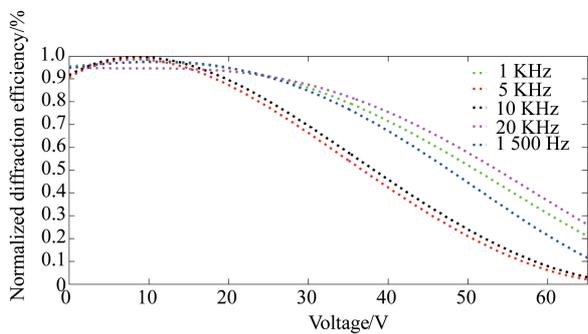


图9 掺杂0.05%纳米银颗粒的 H-PDLC 光栅的归一化衍射效率随电压变化  
 Fig. 9 Normalized diffraction efficiency of H-PDLC gratings doped with 0.05% Ag nanoparticles varies with voltage

5 kHz 与 10 kHz 范围内,有一个确定的外加电场频率值,可以获得光栅调控的最低阈值电压.而在图 8 (a) 曲线转折点中,只有液晶中纳米银含量占总体

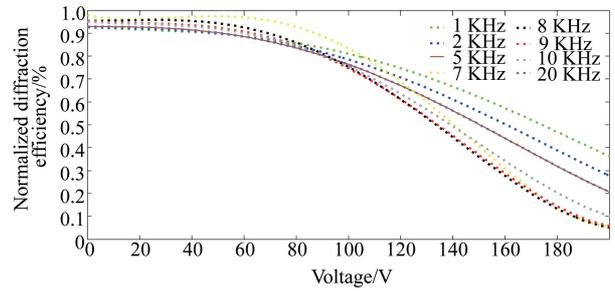


图10 掺杂0.1%纳米银颗粒的 H-PDLC 光栅的归一化衍射效率随电压变化  
 Fig. 10 Normalized diffraction efficiency of H-PDLC gratings doped with 0.1% Ag nanoparticles varies with voltage

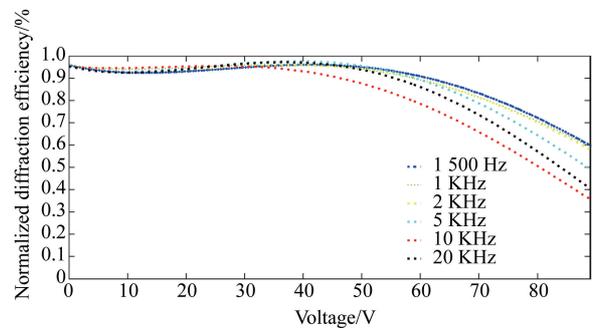


图11 掺杂0.2%纳米银颗粒的 H-PDLC 光栅的归一化衍射效率随电压变化  
 Fig. 11 Normalized diffraction efficiency of H-PDLC gratings doped with 0.2% Ag nanoparticles varies with voltage

纳米银的比例从 50% (5 179 Hz) 到 100% (6 816 Hz) 所对应着外加电场频率值是在 5 ~ 10 kHz 内.从而可以说明实验过程中光栅液晶中纳米银含量超过 50%.

在图 10,掺杂 0.1% 纳米银浓度的 H-PDLC 光栅电光特性曲线中可以看出阈值电压大约最低时,所对应的外加电场频率的曲线为 8 kHz 与 9 kHz,如图红黑曲线.所以在 8 ~ 9 kHz 范围内,有一个确定的外加电场频率值,可以获得光栅调控的最低阈值电压.而在图 8 (b) 曲线转折点中,只有液晶中纳米银含量占光栅中纳米银总含量的比例从 90% (8 314 Hz) 到 100% (9 437 Hz) 之间对应着外加电场频率在 8 kHz 到 9 kHz 之间,这说明此时光栅中液晶条纹中纳米银含量占比超过 90%.

在图 11,掺杂 0.2% 纳米银浓度的 H-PDLC 光栅电光特性曲线中可以看出阈值电压大约最低时,所对应的外加电场频率的曲线为 10 kHz 与 20 kHz,如图红黑曲线.而在图 8 (c) 曲线转折点中,只有液晶中纳米银含量占光栅中纳米银总含量的比例从

70% (10 788 Hz) 到 100% (18 097 Hz) 之间对应着外加电场频率在 10 kHz 到 20 kHz 之间,这说明此时光栅内液晶中纳米银占比超过 70%。从而不管掺杂多少浓度的纳米颗粒,可以证明实验过程中的纳米银掺杂的全息聚合物分散液晶光栅中纳米银大部分分布在液晶条纹中,小部分在聚合物条纹内,理论上推断全息聚合物分散液晶光栅中的纳米银的分布。

## 5 结论

从以上模拟结果来看,掺杂不同浓度的纳米银以及纳米银在聚合物分散液晶光栅中非均匀分布受其外加电场频率的影响,会改变电控光栅的阈值电压,呈现一个先降再升的趋势,进一步调节驱动电场频率,获得更低的驱动电压阈值。

通过实验测得光栅的最优驱动电场频率范围,来获知纳米银在光栅中分布性情况,通过理论验证,纳米银颗粒会集中在液晶条纹中,少量在聚合物条纹中。同时,还可研究影响弛豫振荡的其他因素如掺杂不同的金属纳米粒子的电学和物理等特性,为进一步实验研究其分布性,提供了有价值的参考。

## References

- [1] HUI L I, ZHANG X Y, ZHANG T X, *et al.* Optical imaging characteristics of a new liquid crystal lens [J]. *Journal of Infrared & Millimeter Waves* (李晖, 张新宇, 张天序, 等. 一种新型液晶透镜的光学成像特性研究[J]. *红外与毫米波学报*), 2009, **28**(6):428-431.
- [2] ZHANG Zhao-xiang, PAN Nan-sheng, XI Zhong-he, *et al.* Electrically tunable liquid crystal filter for infrared wave band. [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (张兆祥, 潘南生, 奚中和, 等. 红外波段液晶电调谐滤波器. *红外与毫米波学报*), 1996(6):423-427.
- [3] Zhang M, Zheng J, Gui K, *et al.* Electro-optical characteristics of holographic polymer dispersed liquid crystal gratings doped with nanosilver. [J]. *Applied optics*, 2013, **52**(31):7411.
- [4] Y. J. Liu, X. W. Sun, H. T. Dai, *et al.* Effect of surfactant on the electro-optical properties of holographic polymer dispersed liquid crystal Bragg gratings [J]. *Opt. Mater.*, 2005, **27**:1451-1455.
- [5] Wang K, Zheng J, Gui K, *et al.* Improvement on the Performance of Holographic Polymer-Dispersed Liquid Crystal Gratings with Surface Plasmon Resonance of Ag and Au Nanoparticles[J]. *Plasmonics*, 2015, **10**(2):383-389.
- [6] Vaia R A, Dennis C L, Natarajan L V, *et al.* One-Step, Micrometer-Scale Organization of Nano- and Mesoparticles Using Holographic Photopolymerization; A Generic Technique[J]. *Advanced Materials*, 2001, **13**(20):1570-1574.
- [7] Li C, Cao L, He Q, *et al.* Holographic kinetics for mixed volume gratings in gold nanoparticles doped photopolymer. [J]. *Optics Express*, 2014, **22**(5):5017-5028.
- [8] Li C, Cao L, Wang Z, *et al.* Hybrid polarization-angle multiplexing for volume holography in gold nanoparticle-doped photopolymer. [J]. *Optics Letters*, 2014, **39**(24):6891-4.
- [9] Juhl A T, Busbee J D, Koval J J, *et al.* Holographically directed assembly of polymer nanocomposites. [J]. *ACS Nano*, 2010, **4**(10):5953.
- [10] Mishra K G, Dubey S K, Mani S A, *et al.* Comparative study of nanoparticles doped in liquid crystal polymer system[J]. *Journal of Molecular Liquids*, 2016, **224**:668-671.
- [11] Li C, Cao L, Li J, *et al.* Improvement of volume holographic performance by plasmon-induced holographic absorption grating [J]. *Applied Physics Letters*, 2013, **102**(6):2736.
- [12] Klosterman J, Natarajan L V, Tondiglia V P, *et al.* The influence of surfactant in reflective HPDLC gratings [J]. *Polymer*, 2004, **45**(21):7213-7218.
- [13] Zheng J, Gui K, Zhang M, *et al.* The Frequency Modulation Electro-Optical Response of Holographic Polymer Dispersed Liquid Crystal Display Doped With Nano Ag [J]. *Journal of Display Technology*, 2014, **10**(3):215-222.
- [14] CHEN Jie, ZHU Zhen-cai. Study of the vertically aligned liquid crystal light valve and its photoelectric performance [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (陈杰, 顾培夫. 垂直定向液晶光阀及光电特性的研究. *红外与毫米波学报*), 1996(4):303-308.
- [15] Wu B G, Erdmann J H, Doane J W. Response times and voltages for PDLC light shutters [J]. *Liq. Cryst.*, 1989, **5**:1453-1465.