

# 铁电液晶显示的交流稳态技术与等效电路模型改进

王梦遥, 潘 炜, 罗 斌, 张伟利, 邹喜华

(西南交通大学信息科学与技术学院光通信与光器件研究所, 四川成都 610031)

**摘 要:** 针对交流稳态技术提出了一种改进的能体现铁电液晶电学、光学各向异性的等效电路模型。通过将介电张量与电场的耦合作用和由表面定向层引起的锚定能量以等效源的形式表达在电路模型中, 成功地将模型拓展到介电各向异性情况下。分别就正、负性介电各向异性及应用交流稳态技术时的光响应特性和动力学机制进行了模拟, 并给出了对应的介电扭矩、铁电扭矩和极化反转电流。模拟结果吻合于理论分析及文献报道的结果, 表明了电路模型的有效性。

**关键词:** 铁电液晶; 等效电路模型; 交流稳态技术; 介电各向异性

**中图分类号:** TN873; O48 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(2007)10-1968-05

## The AC Stabilization Technique and an Improved Equivalent Circuit Model for Displays Incorporating Ferroelectric Liquid Crystals

WANG Meng-yao, PAN Wei, LUO Bin, ZHANG Wei-li, ZOU Xi-hua

(School of Information Science and Technology, Institute of Optical Communications,

Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031, China)

**Abstract:** An improved equivalent circuit model for ferroelectric liquid crystal (FLC) in which the anisotropic electro optical properties are presented is proposed to simulate the AC stabilization technology. The coupling effects of electric fields to dielectric tensor as well as the surface anchoring forces due to alignment layers are included in the model by equivalent current sources to make it has the capability in optical response prediction and dynamic analysis when dielectric anisotropy of FLC is of a relatively high value. Optical responses in cases of positive anisotropy and negative anisotropy, and with AC stabilization technology are displayed, and the dielectric torque, ferroelectric torque and polarization reversal current are given. The simulation results indicate a good quantitative agreement with the theoretical analysis and the published results.

**Key words:** ferroelectric liquid crystal(FLC); equivalent circuit model; AC stabilization technology; dielectric anisotropy

### 1 引言

铁电液晶(Ferroelectric Liquid Crystal: FLC)能以几微秒的速度切换“开”、“关”状态,在显示领域具备很好的发展潜力<sup>[1,2]</sup>。对 FLC 的动力学机制进行科学建模、准确分析一直是 FLC 显示技术的重要理论研究内容。目前已有的建模方法主要包括数值模型<sup>[3,4]</sup>和等效电路模型<sup>[5,6]</sup>两类,本文采用的是等效电路模型方法。与数值模型相比,该方法不需要复杂的数值运算,可以直接构造出 SPICE 等电路模拟软件能够处理的电路结构,亦可方便的处理外部接口电路及与其它光电器件的互联问题<sup>[7]</sup>,因而在半导体激光器、CMOS 互联器等许多光电器件中得到了成功应用<sup>[8,9]</sup>。在前期工作中,我们已建立了 FLC 的等效电路模型<sup>[10,11]</sup>。而本文的贡献在于

通过可控电流源将介电张量与电场的耦合作用以及由表面定向层引起的锚定能量引入到电路模型中,从而使改进的电路模型能够更真实的模拟 FLC 的光响应特性和更完善的解释响应的动力学机制。本文后续部分组织如下:第 2 节讨论了人字纹结构 FLC 的介电各向异性、推导了动力学方程并给出了改进的等效电路模型,第 3 节给出并分析了正、负性介电各向异性及应用交流稳态技术时的模拟结果,最后第 4 节对等效电路模型的有效性、普适性和延拓性等进行了综述。

### 2 FLC 的介电各向异性、动力学方程及等效电路模型改进

#### 2.1 FLC 的介电各向异性

FLC 的基本结构如图 1 所示,由经过平行取向处理

收稿日期: 2006-08-09; 修回日期: 2007-03-12

基金项目: 国家自然科学基金(No. 10174057; 90201011); 教育部科学技术研究重点项目(No. 105148); 四川省应用基础研究项目(No. 03JY029-048-1); 西南交通大学科学研究基金(No. 2001B11)

的两块电极基板间充以铁电型液晶构成<sup>[12]</sup>。图中小圆锥体为液晶晶胞, 晶胞圆锥角为  $\theta$ ; 圆锥面上的长棒为 FLC 指向矢, 指向矢围绕圆锥的中心轴旋转, 旋转角为  $\varphi$ ; 液

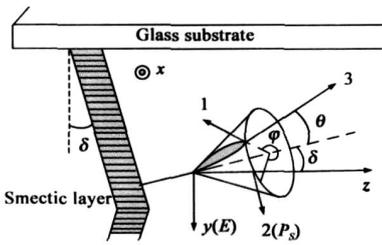


图 1 人字纹 FLC 盒的基本结构, 图中为盒的上半部分

晶分子层面呈倾角为  $\delta$  的人字纹结构。  $P_s$  是 FLC 的自发极化强度。 (1, 2, 3) 和  $(x, y, z)$  分别是晶胞参考系和液晶盒参考系。人字纹层结构 FLC 在沿指向矢方向、平行于分子层面方向以及垂直于分子层面方向的物理性质各不相同, 其介电系数  $\epsilon$  为二阶张量, 在晶胞参考系下  $\epsilon$  可写为  $3 \times 3$  的对角矩阵, 其在 1 轴, 2 轴和 3 轴上的特征值  $\epsilon_1, \epsilon_2$  和  $\epsilon_3$  为该矩阵的对角元。  $\epsilon_2$  与  $\epsilon_1$  的差  $\partial\epsilon = \epsilon_2 - \epsilon_1$  称介电二轴系数,  $\Delta\epsilon = \epsilon_3 - \epsilon_1$  称单轴异性系数。计算  $\epsilon$  与电场的耦合作用, 首先要计算  $\epsilon$  在电场方向上的分量  $\epsilon_{yy}$ 。将  $\epsilon$  由参考系 (1, 2, 3) 下变换到参考系  $(x, y, z)$  下可计算出  $\epsilon_{yy}$ 。该参考系变换分为三步: 首先绕 2 轴旋转  $\theta$  角, 然后绕 3 轴旋转  $\varphi$  角, 最后绕 1 轴旋转  $\delta$  角, 可用旋转矩阵  $R$  表征, 有

$$R = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \delta & -\sin \delta \\ 0 & \sin \delta & \cos \delta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \varphi & -\sin \varphi & 0 \\ \sin \varphi & \cos \varphi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & \sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (1)$$

经参考系变换后的介电张量  $\epsilon'$  与变换前的  $\epsilon$  存在如下关系  $\epsilon' = R\epsilon R^{-1}$  (2)

将式(1)代入式(2)中, 并利用关系  $\Delta\epsilon = \epsilon_3 - \epsilon_1$  和  $\partial\epsilon = \epsilon_2 - \epsilon_1$  进行整理, 得到  $\epsilon_{yy}$  为<sup>[13]</sup>

$$\epsilon_{yy} = \epsilon_1 + \Delta\epsilon(\sin\theta \cos\delta \sin\varphi - \cos\theta \sin\delta)^2 + \partial\epsilon \cos^2\delta \cos^2\varphi \quad (3)$$

### 2.2 FLC 等效电路模型的改进

改进后的 FLC 等效电路模型如图 2 所示。模型分为三部分, 分别对应 FLC 的端口电特性、晶胞物理特性和动力学方程在电路模型中的具体实现、以及光透射率输出。对于端口电特性, 引入电流源  $G_{in}$  刻画由指向矢转动引起的电流源变化, 即极化反转电流。对于实现晶胞物理特性和动力学方程的部分, 采用积分电容  $C_{out}$  描述 FLC 指向矢的转动,  $C_{out}$  上的电压  $V_{out}$  即表征旋转角。电流源  $G_r, G_k, G_{ps}$  和  $G_e$  分别等效于粘滞扭矩、恢复扭矩、铁电扭矩和介电扭矩。由于  $\epsilon$  的各个对角元与光折射率间存在  $\epsilon_1 = n_1^2, \epsilon_2 = n_2^2$  和  $\epsilon_3 = n_3^2$  的关系, 且介电扭矩是  $\Delta\epsilon(\epsilon_3 - \epsilon_1)$  和  $\partial\epsilon(\epsilon_2 - \epsilon_1)$  的函数, 因此介电扭矩实际上反映了 FLC 的电、光学各向异性, 并通过电流源  $G_e$  体现在等效电路模型中。最后, 光透射率由电压源  $E_{out}$  输出。

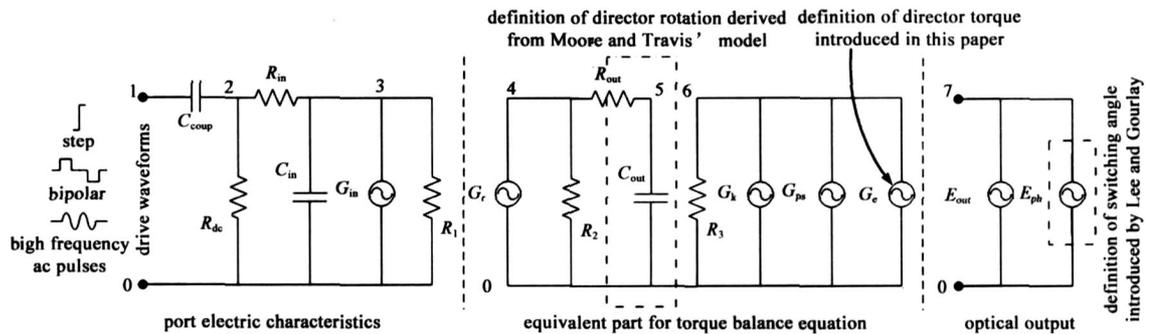


图 2 改进的 FLC 等效电路模型, 控制源  $G_k, G_{ps}$  和  $G_e$  分别等效动力学方程中的恢复扭矩、铁电扭矩和介电扭矩, 数字 1、2、..... 7 表示电路节点

### 2.3 FLC 动力学方程

一般来讲, 在电场作用下 FLC 的自由能密度  $f$  主要由铁电能密度、介电能密度和表面锚定能密度决定。自由能密度  $f$  可写为<sup>[12]</sup>

$$f = P_s E \cos \delta \cos \varphi - \frac{1}{2} \epsilon_{yy} \epsilon_0 E^2 + \frac{w}{2d} \sin^2(\varphi - \varphi_0) \quad (4)$$

方程中的三项能量密度从左至右依次是铁电能密度  $f_{ps}$ 、介电能密度  $f_e$  和表面锚定能密度  $f_k$ 。  $\varphi_0$  是初始旋转角,  $\epsilon_0$  是真空电容率,  $d$  是液晶层厚度,  $w$  是表面锚定能强度。根据 Euler-Lagrange 原理, 介电扭矩、铁电扭矩和恢复扭矩分别为

$$T_{ps} = - \partial f_{ps} / \partial \varphi, T_e = - \partial f_e / \partial \varphi, T_k = - \partial f_k / \partial \varphi \quad (5)$$

因此得到描述 FLC 指向矢随时间运动的动力学方程为

$$\gamma \frac{d\varphi}{dt} = P_s E \sin \varphi \cos \delta + \epsilon_0 E^2 [(\Delta\epsilon \sin^2 \theta - \partial\epsilon) \times \cos^2 \delta \sin \varphi \cos \varphi - \frac{\Delta\epsilon}{4} \sin 2\theta \sin 2\delta \cos \varphi] - \frac{w}{2d} \sin 2(\varphi - \varphi_0) \quad (6)$$

其中  $\gamma$  是转动粘滞系数。为了将动力学方程转化为电路模型, 式(6)中的角  $\varphi$  必须被转换成  $V_{out}$  ( $V_{out} = \varphi \times \pi/180$ ) 的电压形式, 相应地在模型中角  $\delta$  和  $\theta$  分别替换为  $\delta \times \pi/180$  和  $\theta \times \pi/180$ 。

### 3 模拟结果与讨论

模拟参数取 FLC 典型参数<sup>[12, 13]</sup>: 自发极化强度  $30.6 \text{ nC/cm}^2$ , 转动粘滞系数  $65 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ , 表面锚定能强度  $2 \times$

$10^{-3} \text{J/m}^2$ , 晶胞电容  $4.9 \text{nC/cm}^2$ , 电阻  $20 \text{M}\Omega \cdot \text{cm}^2$ , 晶胞面积  $10 \text{cm}^2$ , 液晶层厚度  $1.4 \mu\text{m}$ , 本征锥角  $18^\circ$ , 人字纹倾角  $16^\circ$ , 初始旋转角  $6^\circ$ . 负性介电各向异性情况下,  $\Delta\epsilon$  和  $\partial\epsilon$  分别取  $-1$  和  $0.24$ ; 正性介电各向异性情况下,  $\Delta\epsilon$  和  $\partial\epsilon$  分别取  $0.7$  和  $0$ . 另外, 为便于直观的分析, 在 3.1 节中取人字纹倾角为  $0^\circ$ , 初始旋转角为  $1^\circ$ .

### 3.1 介电扭矩对 FLC 光电响应时间的影响

定义光响应从  $0 \sim 10\%$  的时间为延迟时间  $t_d$ , 从  $10 \sim 90\%$  的时间为上升时间  $t_r$ . 同时, 定义参数  $\alpha$  反映式 (6) 中介电扭矩与铁电扭矩间的相互关系, 若  $\delta = 0^\circ$ , 有  $\alpha = \epsilon_0 |E| (\Delta\epsilon \sin^2\theta - \partial\epsilon) / P_s$ .  $\alpha < 0$  为负性介电各向异

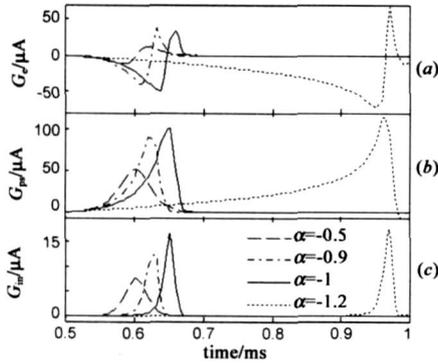


图 3  $\alpha < 0$  时的 (a) 介电扭矩 (b) 铁电扭矩和 (c) 极化反转电流

性,  $\alpha > 0$  为正性介电各向异性. 可以看出,  $\alpha$  与  $|E|$  成正比. 由 FLC 的动力学方程式 (6), 介电扭矩对指向矢的作用不仅与施加电场的作

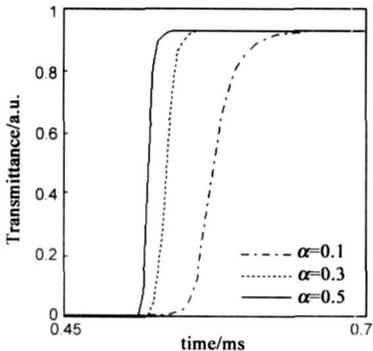


图 4  $\alpha > 0$  时光透射率随时间的变化曲线

用时间相关, 而且与  $\alpha$  的符号相关. 若  $\alpha < 0$ , 介电扭矩在响应初始时削弱铁电扭矩, 当  $\varphi$  超过临界值 ( $\varphi > 90^\circ$ ) 后则增强铁电扭矩, 如图 3 所示. 从图中可以看出, 响应开始时介电扭矩与铁电扭矩符号相反, 当电压持续作用一段时间后介电扭矩与铁电扭矩符号相同, 且  $|\alpha|$  越

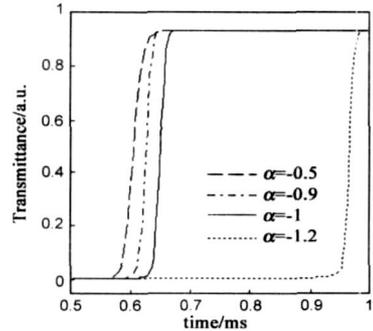


图 5  $\alpha < 0$  时光透射率随时间的变化曲线

大, 介电扭矩削弱铁电扭矩的时间越长, 极化反转电流峰值在时间轴上的位置后移, 而若  $\alpha > 0$ , 上述情况则正好相反. 介电扭矩

与铁电扭矩间的竞争将影响 FLC 的响应时间,  $\alpha > 0$  与  $\alpha < 0$  两种情况下光透射率随时间的变化曲线分别见图 4 和图 5. 由图可见, 随着电压幅度的提高:  $\alpha > 0$  时, 液晶响应速度在响应开始的部分加快, 但在  $\varphi > 90^\circ$  后由于介电扭矩的抵制作用反而减慢;  $\alpha < 0$  时, 光响应将随着  $t_d$  的明显增加而最终截止. 针对  $t_d$  和  $t_r$  的模拟结果则表明, 当  $\alpha > 0$  ( $\alpha < 0$ ) 时,  $t_r$  ( $t_d$ ) 存在最小值,  $t_d$  ( $t_r$ ) 随电压增加而减少, 说明电压较低时铁电扭矩在响应过程中起主要作用,  $t_r$  和  $t_d$  均随电场强度增加而减少, 而介电扭矩随着电压幅度的提高将逐渐超过铁电扭矩在响应中起主要作用, 在  $\alpha > 0$  和  $\alpha < 0$  两种情况下都使响应逐渐截止. 以上结果与文献 [14] 所报道的数值计算结果一致.

### 3.2 交流稳态技术的应用

由于人字纹层结构中液晶层发生倾斜, 因此 FLC 的有效转动锥角远小于液晶材料本身具有的锥角, 使得器件的显示视角、对比度和记忆特性均不理想. 图 6 给出了关于记忆特性的一组模拟曲线, 从图 6(b) 中不难看出, 移去施加的外电场后, 光对比度明显下降. 交流稳态技术是一种利用负性介电各向异性的技术手段, 它可以用来改善 FLC 的记忆特性, 如图 7 所示. 在图 7(a) 所示的驱动电压中, 双极性脉冲间加入了高频交流脉冲信号. 对比图 6(b) 和图 7(b), 采用交流稳态技术后 FLC “亮态” 的透射率从 75% 提高到了 90%. 要指出的是, 高频交流脉冲信号的频率必须足够高以抑制铁电扭矩的作用, 否则足够大的铁电扭矩将使液晶指向矢偏转到相反的状态. 如图 7(d), 高频交流脉冲信号作用时的铁电扭矩明显低于双极性脉冲信号作用时的

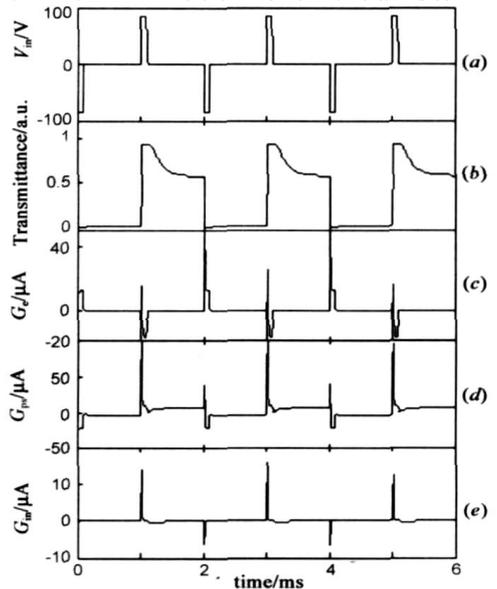


图 6 未采用交流稳态技术 (a) 驱动电压, (b) 光透射率, (c) 介电扭矩, (d) 铁电扭矩和 (e) 极化反转电流

值,因而极化反转电流的峰值仍然只发生在双极性脉冲作用的位置上,见图 7(e)。而高频并不会抑制介电扭矩的作用,因为介电扭矩对电场的符号不敏感,见图 7(c)。

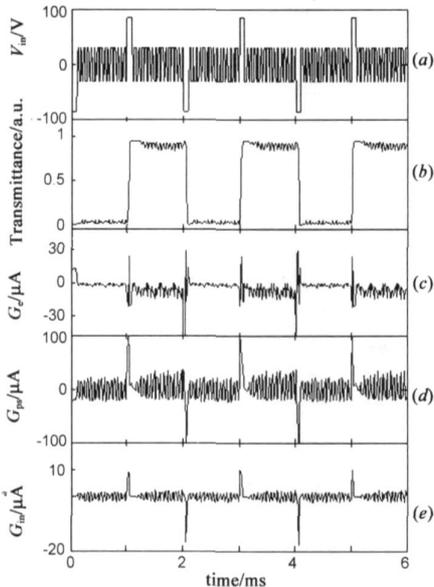


图 7 采用交流稳态技术 (a) 驱动电压, (b) 光透射率, (c) 介电扭矩, (d) 铁电扭矩和 (e) 极化反转电流

假使高频交流脉冲信号的频率足够高,还可以利用其完成液晶指向矢的开关响应,如图 8 所示。图 8(a)

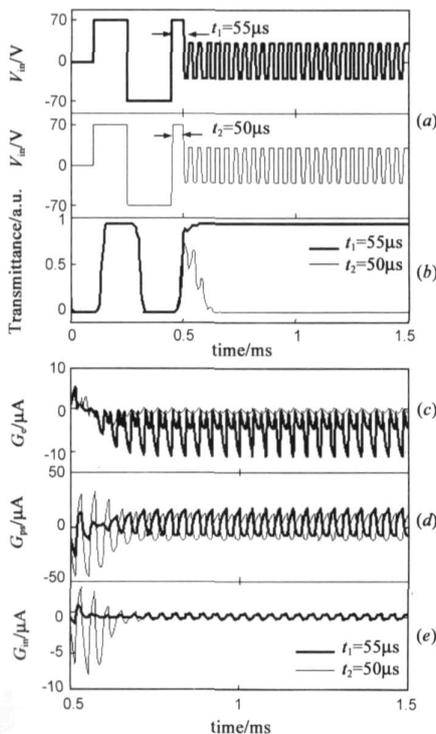


图 8 采用交流稳态技术完成 FLC 开关响应 (a) 驱动电压, (b) 光响应曲线, (c), (d), (e) 分别是高频交流脉冲作用部分的介电扭矩, 铁电扭矩和极化反转电流

上半部分(粗线所示)的开启脉冲(70V, 55 $\mu$ s)使指向矢转换到“亮态”;而下半部分(细线所示)稍小的开启脉冲(70V, 50 $\mu$ s)则使指向矢回复“暗态”。两开启脉冲仅相差 9%。为解释产生这一现象的动力学机制,图 8(c)、(d)、(e) 分别给出了高频交流脉冲作用下的介电扭矩、铁电扭矩和极化反转电流。如图所示,开启脉冲为(70V, 55 $\mu$ s)时的介电扭矩较大,这时指向矢在介电扭矩的作用下转换到“亮态”上;而开启脉冲为(70V, 50 $\mu$ s)时,介电扭矩几乎为零,因此指向矢在开启脉冲结束后回到初始的“暗态”。图 8(d) 反映出开启脉冲的微弱减小使脉冲刚结束后的铁电扭矩明显下降。图 8(e) 中极化反转电流没有出现明显的峰值则说明高频交流脉冲信号抑制了铁电扭矩的作用,指向矢没有翻转。

#### 4 结束语

本文报道了一种改进的 FLC 等效电路模型,给出了正、负性介电各向异性以及应用交流稳态技术时的光响应曲线、铁电扭矩、介电扭矩和极化反转电流,模拟结果与理论分析和文献报道结果相符。等效电路模型是一种采用电学元件表达器件物理特性和端口特性的方法,它可以方便的扩展到以 FLC 作调制层的一般光电器件中,具备较强的普适性和延拓性。值得一提的是,本文假设所有器件参数不受外界温度及电压频率的影响,基于温度和频率变化的光响应特性研究是我们下一步要开展的工作之一。

#### 参考文献:

- [1] K Shinya. Ultra high resolution FLC display for PDA [J]. Displays, 2004, 25(1): 31-36.
- [2] E Garcier Caurel, A D Martino, B Drévilion. Spectroscopic mueller polarimeter based on liquid crystal devices [J]. Thin Solid Films, 2004, 455-456(1): 120-123.
- [3] F Giebelmann, P Zugenmaier. Computer simulation of the electro-optical switching process in ferroelectric liquid crystal cells with bookshelf geometry [J]. Liquid Crystals, 1993, 14(2): 389-404.
- [4] J M Oñán, J M S Pena, J Sabater. Modelling and characterization of ferroelectric liquid crystal displays [J]. Optical and Quantum Electronics, 1994, 26(S): 571-581.
- [5] T Yamaguchi, Y Hara, H Fujiwara, et al. Equivalent circuit model for thresholdless antiferroelectric liquid crystal displays [J]. Japanese Journal of Application Physics, 1999, 38(7A): 4127-4131.
- [6] Y Lee, J Gourlay, W J Hossack, et al. Modelling of binary phase modulation in surface stabilized ferroelectric liquid crystal spatial light modulators [J]. Microelectronics Journal, 2004, 35(2): 193-201.

- [7] M Y Wang, W Pan, B Luo, et al. Optimization of gray-scale performance in pixellated metal mirror FLG OASLM by equivalent circuit model[J]. *Microelectronics Journal*, 2007, 38(2): 203–209.
- [8] X M Shi, J G Ma, K S Yeo, et al. Equivalent circuit model of our wafer CMOS interconnects for RFICs[J]. *IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems*, 2005, 13(9): 1060–1071.
- [9] C Maier, M Emmenegger, S Taschini, et al. Equivalent circuit model of resistive IC sensors derived with the box integration method[J]. *IEEE Transactions on Computer Aided Design of Integrated Circuits and Systems*, 1999, 18(7): 1000–1013.
- [10] 潘炜, 张晓霞, 罗斌等. 铁电液晶光电响应特性的电路级模拟[J]. *电子学报*, 2002, 30(5): 708–710.  
Pan Wei, Zhang Xiaoxia, Luo Bin, et al. Circuit level model of photoelectricity response in ferroelectric liquid crystal[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2002, 30(5): 708–710. (in Chinese)
- [11] 王梦遥, 潘炜, 罗斌, 等. FLC 编码系统中材料参量设计的电路实验研究[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2006, 14(4): 590–596.  
Wang Mengyao, Pan Wei, Luo Bin, et al. Study on ferroelectric liquid crystal material parameters design for phase encryption system by circuit model[J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2006, 14(4): 590–596. (in Chinese)
- [12] T Sako, N Itoh, Sakaigawa A, et al. Switching behavior of surface stabilized ferroelectric liquid crystals induced by pulse

voltage[J]. *Applied Physics Letters*, 1997, 71(4): 461–463.

- [13] M Wnek, J K Mosciki, A d Alessandro, et al. Studies of anchoring conditions for different aligning materials from the dielectric behavior of SSFLC cells[A]. *Proceedings of SPIE [C]*. Washington, 1997. 86–89.
- [14] J Z Xue, M A Handschy, N A Clark. Electrooptic response during switching of a ferroelectric liquid crystal cell with uniform director orientation[J]. *Ferroelectrics*, 1987, 73: 305–314.

#### 作者简介:



王梦遥 女, 1982年5月出生于江西南昌, 西南交通大学信息科学与技术学院博士研究生, 主要研究方向为光电混合系统建模、光电信息处理及应用, 已发表论文十篇。

E-mail: yaoyao\_0526@163.com



潘炜 男, 1959年12月出生于安徽蚌埠, 西南交通大学信息科学与技术学院副院长, 四川省有突出贡献的优秀专家, 工学博士, 教授, 博士生导师. 主要研究方向为光通信与光器件、光信息处理与非线性系统理论等, 已发表论文八十余篇. E-mail: weipan80@sina.com