

# 铁电液晶光电响应特性的电路级模拟

潘 炜<sup>1</sup>, 张晓霞<sup>2</sup>, 罗 斌<sup>1</sup>, 陈建国<sup>3</sup>

(1. 西南交通大学计算机与通信工程学院, 四川成都 610031;

2. 电子科技大学光电子技术系, 四川成都 610054; 3. 四川大学光电系, 四川成都 610064)

**摘 要:** 针对铁电液晶(FELC)的简单物理结构模型,借助可变电流量来刻画因指向矢的转动而引起的电流变化,构造出相应的等效电子电路(宏模型),将电路级仿真系统扩展到光电混合集成回路.提出采用 Pspice 电路级分析模拟软件,通过控制模型参数,应用不同的信号(方波、正弦波、单或双极性脉冲等)激励源,分别就铁电液晶的端口电特性和光电响应特性实施了动态仿真研究.FELC 模型开关特性的分析结果与已报道的理论及实验基本一致,并显示出良好的记忆特性.

**关键词:** 铁电液晶; 光电响应; 指向矢; 电路级模型

**中图分类号:** TN141.9; O753

**文献标识码:** A

**文章编号:** 0372-2112 (2002) 05-0708-03

## Circuit-Level Model of Photoelectricity Response in Ferroelectric Liquid Crystal

PAN Wei<sup>1</sup>, ZHANG Xiao-xia<sup>2</sup>, LUO Bin<sup>1</sup>, CHEN Jiann-guo<sup>3</sup>

(1. College of Computers and Communications Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031, China;

2. Dept. of Optoelectronic Technology, University of Electronic Science and Technology, Chengdu, Sichuan 610054, China;

3. Dept. of Optoelectronics Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610064, China)

**Abstract:** A model that predicts the optical transmission switching curve of the ferroelectric liquid crystal (FELC) with an arbitrary drive voltage is presented using Pspice simulator, which is a general circuit analysis software, including square, sine, pulse and triangular waves. The model shows turn-on delay, transient response, and almost perfect memory characteristic of the FELC. The analytic results are in basic agreement with reported theoretical and experimental data. We also integrate these models into electronic computer-aided design tools, which will enable circuit and system designers to simultaneously simulate electrical and optical performance.

**Key words:** ferroelectric liquid crystal; photo-electricity response; director; circuit-level model

### 1 引言

铁电液晶(FELC)在光电数字或图象的显示和非线性光学领域很有吸引力<sup>[1~4]</sup>.因其具有彩色显示,对比度清晰,分辨率高,阈值电压低,响应速度快和良好的热稳定性等优点,特别适用于制作高分辨和信息容量大的光电器件<sup>[3,4]</sup>.FELC的光电显示基于极化反转,其响应速度比普通丝状液晶快几个量级,液晶光阀的开关响应也小于10微秒.在非线性光学方面,可用于空间光调制及光交换开关,其二次谐波发生效率已不低于常用的无机非线性光学晶体<sup>[4]</sup>.

目前有关FELC的电路级模拟研究尚不多见.一般地说,由于FELC的非线性,只能做数值计算,故如何将EDA(电子电路设计自动化)这一现代电子工程领域的新兴技术,引入到FELC特性的仿真研究中,正是本文立论的初衷.文中首先基于FELC的简单物理模型,借助可变电流量(作为指向矢旋转角的函数)来刻画因指向矢的转动而引起的电流变化,构造出

相应的等效电子电路;其次采用Pspice软件(Microsim公司最新推出的EDA Pspice 9版本<sup>[6]</sup>)将电路级仿真系统扩展到光电集成回路.在这种集动态系统设计、仿真和分析为一体的可视化设计环境下,有效地解决了早期Spice视窗版处理微分和积分函数不好用的困难,针对FELC的端口电特性和光电响应实施动态仿真研究,分析结果较好地吻合了文献中的理论与实验结果.

### 2 物理模型

#### 2.1 铁电液晶的结构

液晶按其结构可分为三类:丝状相(Nematic phase)、螺旋状相(Cholesteric phase)和层状相(Smectic phase).层状A相中分子呈层状结构,各层分子与层面垂直;层状C相各层分子与层面成一非90°的角度.如果层状C相中的分子是手性(Chirality)分子,而且具有与长轴垂直的电偶极矩,则它可具有铁电性,SmC\*相就是常见的FELC.FELC“ $\Gamma$ ”字形分子层面

收稿日期:2001-07-23;修回日期:2001-10-15

基金项目:国家自然科学基金(No. 10174057;No. 69777019);西南交通大学科学研究基金(No. 2001B11)

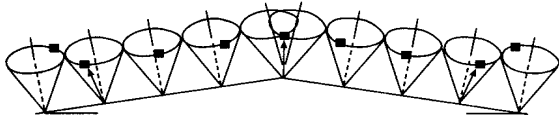


图 1 FLC“H”形分子层面的晶胞排列示意图

的晶胞排列示意图,如图 1 所示,图中小圆锥体为晶胞,晶胞排列近似垂直于分子层面,“.”为指向矢的顶点,指向矢围绕圆锥的中心轴旋转.

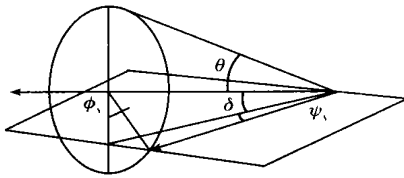


图 2 FLC 晶胞指向矢的方位角

2.2 理论模型

FLC 是一种具有特定分子结构的有机化合物凝聚体,其结构基元的排列具有一维或二维近似长程有序.FLC 的力学性质如同流体,但它的电、光、热等物理性质却如同晶体,具有显著的各向异性<sup>[4]</sup>.类似于铁电体存在有居里点,居里-外斯定律,电畴结构,电滞回线,自发极化以及相应的晶胞形变(自发应变)等.

某些特殊晶体(如 FLC)能够自发地产生偶极矩,并有序排列,这种极化强度称为自发极化强度,它的方向可被外加电场反向.如图 2 所示,设液晶分子层面呈“H”字形,其倾斜角为  $\psi$ ,晶胞的圆锥角为  $\theta$ ,指向矢的旋转角为  $\phi$ ,在分子层面的投影角为  $\psi$ . FLC 指向矢的取向可以由边界条件加以控制(如液晶盒对液晶分子的锚定),也可以用外加磁场或电场的办法使它作定向排列.不妨设晶胞的方位角为  $\phi$ ,它与材料、间距和温度有关,则单位体积内,FLC 的动力学方程可写为<sup>[3,4]</sup>

$$\frac{d\phi}{dt} = P_s E \cos \phi + R(\phi) \quad (1)$$

其中,恢复力矩  $R(\phi) = K \cos \phi$ ,  $K$  是弹性常数,与样品的厚度有关.  $E$  是外电场强度,  $P_s$  是转动粘滞系数,当液晶分子层面呈  $\psi$  倾斜角的“H”字形时,式(1)改写为

$$\frac{d\phi}{dt} = P_s E \cos \phi \cos \psi + R(\phi) \quad (2)$$

2.3 铁电液晶的电路模型

Pspice EDA 技术,除了常规的单元电路模拟外,还可以模拟各种寄生参数的影响.为了象处理电信号那样方便地处理光信号(光功率),必须将光信号用电路参量(电流或电压)来表示.从 FLC 的结构和材料的物理光学特性出发,模型参数可分为寄生参量( $R_{in}$ 为考虑到注入电流的泄漏而引入的寄生串联电阻, $C_{in}$ 为寄生并联电容)和 FLC 的指向矢参量,前者

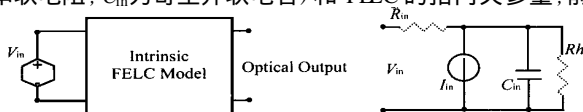


图 3 FLC 的等效电路模型

表征了 FLC 的端口阻抗特性,后者表征了 FLC 的响应特性,由此可构造出 FLC 集总元件形式的等效电路模型.

如图 3 所示,图中  $V_{in}$  为激励信号电压源,并联的可变电流源  $I_{in}(\phi)$  是指向矢旋转角的函数,它刻画了因指向矢的转动而引起的电流变化,有关系<sup>[3]</sup>

$$I_{in}(\phi) = P_s \cos \phi \cos \psi \frac{d\phi}{dt} \quad (3)$$

由式(2),注意到晶胞的厚度  $d$  后,有

$$\phi = [ (V_{out}/d) P_s \cos \phi \cos \psi + R(\phi) ] / dt \quad (4)$$

式中,  $V_{out}$  为输出电压,若晶胞旋转  $2\theta$  角,则透射光功率

$$T = \sin^2 2\theta \quad (5)$$

根据图 2,可进一步推出 满足

$$\tan \psi = \frac{\sin \theta \sin \phi}{\cos \theta \cos \phi + \sin \theta \cos \phi \sin \psi} \quad (6)$$

这样,由可变电流源  $I_{in}(\phi)$  的关系式,借助 Pspice 编程及 Probe 波形显示模块,控制各种参变量,得到铁电液晶光电响应特性的仿真结果.

3 模拟结果与讨论

为避免液晶材料的电化学老化,FLC 显示器的驱动大都采用交流电压信号.根据等效电路模型,模拟参数参见表 1,分别用方波、正弦波、单(双)极性脉冲及三角波激励源,控制激励电压的峰值,并针对不同的入射偏振角,模拟了透射光功率(透光率的响应范围为 10% ~ 90%)随时间变化规律.图 4 中,符号  $\square$ 、 $\sin$ 、 $\delta$  和  $\triangle$  依次对应入射偏振角 - 24°, - 21°, - 18° 和 - 15° 度的情形,另外,由于 Pspice 电路级软件本身的原因,图中上半部纵坐标  $V$  对应于透射光功率的  $W$ ,下半部是方波激励源电压.

表 1 FLC 模型的主要参数<sup>[3,4]</sup>

模型参数	数值	单位
自发极化强度	6.4	nC/cm <sup>2</sup>
转动粘滞系数	65	mPa·s
入射偏振角	- 24	deg
晶胞的圆锥角	21.5	deg
晶胞的厚度	1.5	μm
晶胞的面积	10	cm <sup>2</sup>
倾斜角	18.6	deg

图 4(a) 为峰值  $V_{pp} = \pm 20V$ ,脉宽为 2ms,周期为 4ms 的单极性方波脉冲激励源,而在图 4(b) 和 (c) 中,分别改用峰值  $V_{pp} = \pm 2.5V, \pm 0.6V$  的激励源激励.模拟结果表明,FLC 的响应速度与激励电压密切相关,激励电压越高,响应速度加快.过低的激励电压,出现有较长的拖尾现象,将无法得到理想的透射光功率响应,陡度因子急剧减小.同时,我们也注意到,曲线的形状随入射偏振角的增加而有微弱的移动和拖尾,透光率响应曲线的状态阈值随入射偏振角的减小而趋于模糊;透光率曲线的响应时间(上升时间,下降时间)主要依赖于激励电压的大小.此外,各种寄生参数的影响也是十分明显的,我们将另做讨论.

为了反映出 FLC 的记忆特性,重复上述步骤,可采用峰

值为  $\pm 10V$ , 周期为 4.0ms 的瞬态双极性正弦波信号作为激励源. 由图 5 可见, 上半部 FLC 的透射光功率响应曲线已表现出明显地记忆惯性, 当且仅当双极性信号的电平超出某一范

围时, 才出现状态的反转. 同时, 透光率在很宽的频率范围内只与驱动电压的有效值有关, 这些均与实验结果相一致.

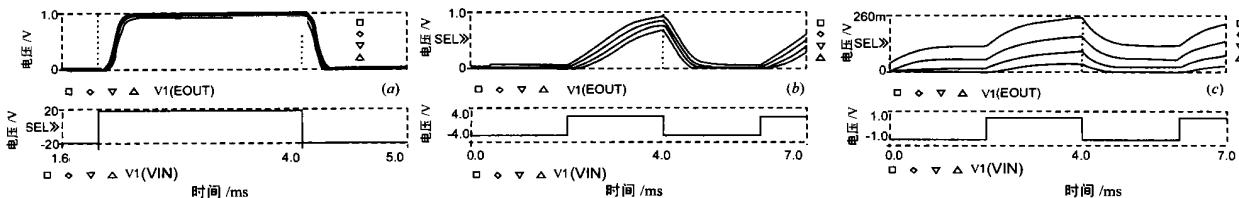


图 4 FLC 的光电响应特性, 上半部是透射光功率  $E_{out}$ , 下半部是方波激励源  $V_{in}$ . (a)  $V_{pp} = \pm 20V$ ; (b)  $V_{pp} = \pm 2.5V$ ; (c)  $V_{pp} = \pm 0.6V$

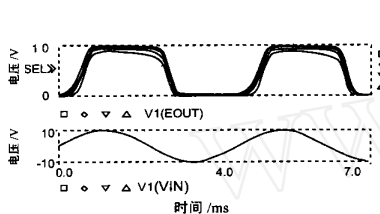


图 5 FLC 记忆特性, 上半部是透射光功率  $E_{out}$ , 下半部是正弦波激励源  $V_{in}$

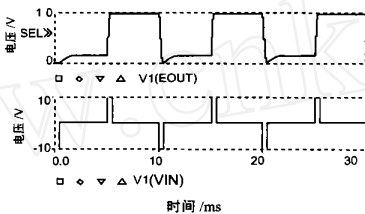


图 6 双极性脉冲激励下的 FLC 记忆特性, 上半部是透射光功率  $E_{out}$ , 下半部是激励源  $V_{in}$

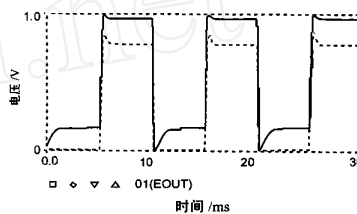


图 7 光电响应随入射偏振角的变化 (实线为 -24 度, 虚线为 -15 度)

图 6 进一步采用脉冲周期为 10ms, 脉冲宽度为 0.5ms 的双极性脉冲激励, 入射偏振角为 -24 度. 模拟结果表明, 仅当双极性脉冲触发 (正向或负向触发) 时, 透射光功率才发生状态的突变, 当触发消失 (激励电压为零时), 仍保持“开”或“关”态, 可见, FLC 模型透射光功率的光电响应, 已显示出良好的记忆特性. 图 7 给出了相同的激励条件下, 响应时间随入射偏振角的变化规律, 即响应的相对强度随入射偏振角的增加而增加, 使得陡度因子增加, 这将有利于大信息容量显示. 此外, 我们还模拟了 FLC 谐波特性与偏置的关系曲线, 以及三角波激励源情形的结果, 均与文献 [3, 5] 给出的实验结果相吻合.

参考文献:

[ 1 ] N A Clark, S T Lagerwall. Submicrosecond bistable electro-optic switching in liquid crystal [J]. Appl Phys Lett, 1980, 36: 899 - 901.  
 [ 2 ] I Dahl, S T Lagerwall, K Skarp. Simple model for the polarization reversal current in a ferroelectric liquid crystal [J]. Phys Rev A, 1987, 36: 4380 - 4389.  
 [ 3 ] J M Oton, J M S Pena, J Sabater. Modelling and characterization of ferroelectric liquid crystal displays [J]. Opt Quant Electr, 1994, 26: S571 - S581.

[ 4 ] S Marrec, M Killinger, P Cambon. A simple electrical model of a ferroelectric liquid crystal cell [J]. Ferroelectrics, 1993, 149: 305 - 318.  
 [ 5 ] 徐克寒, 张彦东, 邢中菁, 等. 矩阵寻址铁电液晶显示器 [J]. 光电子 激光, 2001, 12(5): 442 - 445.  
 [ 6 ] Pspice technical support [DB/OL]. <http://www.microsim.com>, 2000.

作者简介:



潘 炜 男, 1959 生于安徽蚌埠市, 博士, 硕士生导师, 副教授, 现被西南交通大学计算机与通信工程学院聘为课程教授, 主要研究兴趣为: 光电混合电路统计建模及仿真, 非线性系统理论, 半导体器件物理和微电子技术等, 发表论文 30 余篇.



张晓霞 女, 1961 生于青海西宁市, 博士, 硕士生导师, 电子科技大学光电子技术系副教授, 主要从事新型半导体器件和材料, 集成光学, 光通信技术等领域的研究, 发表学术论文 20 余篇.