

液晶的介电各向异性分布对液晶微带线特性的影响

杜 静¹, 汪相如², 黄子强¹, 胡国媛², 吴 亮¹

(1. 电子科技大学 电子科学技术研究院, 四川 成都 610054;

2. 电子科技大学 光电信息学院, 四川 成都 610054)

摘 要: 基于向列液晶的微带传输线模型, 研究了其模场解和 1~100 GHz 频段内传输特性, 采用有限元法较为精确和全面地分析了各向异性非均匀分布的液晶介质对微带传输线模场解和 S 参量的影响, 并且分析了微带电极上施加偏置电压对该传输线 S 参数的影响。仿真结果表明: 该微波传输线模型的回波损耗在考虑液晶的介电各向异性非均匀分布时比传统仿真方法所得结果更低, 随着偏置电压在一定范围内连续增大其 S 参数连续变化, 同时谐振频率连续移动, 并且这种精确的分析方法计算得到的谐振频率点的偏移量相比传统分析方法修正误差 2.4 GHz, 这为液晶微波可调器件的进一步研究奠定了理论基础。

关键词: 介电各向异性分布; 液晶微带线; S 参数; COMSOL 仿真

中图分类号: TN817 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.0820001

Influences of distribution of LC dielectric anisotropy on properties of LC microstrip line

Du Jing¹, Wang Xiangru², Huang Ziqiang¹, Hu Guoyuan², Wu Liang¹

(1. Research Institute of Electronic Science and Technology, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China;

2. School of Optoelectronic Information, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China)

Abstract: The transverse mode and transmission properties in frequency region of 1–100 GHz of a microstrip transmission line model based on nematic liquid crystal (LC) were studied. The influences brought by the distribution of dielectric anisotropy of liquid crystal on the solution and S-parameter of microstrip line were researched through the finite element method accurately and comprehensively, as well as the influences of the bias voltage. Simulation results indicate that the distribution property reduce the echo loss of microstrip line, which is obtained in consideration of the distribution of dielectric anisotropy of liquid. Besides, the S-parameter changes continuously since the voltage between the strip and the ground gradually increases while the resonant frequency moves the same way. Moreover, this accurate method can amend the motion of resonant frequency by 2.4 GHz, compared with the results obtained by

收稿日期: 2015-12-05; 修订日期: 2016-01-17

基金项目: 国家自然科学基金(61405029, 91438108); 中央高校科研基本业务费(ZYGX2013J126)

作者简介: 杜静(1991-), 女, 硕士生, 主要从事液晶微波器件方面的研究。Email: dujing0310@163.com

导师简介: 黄子强(1956-), 男, 教授, 硕士, 主要从事液晶光电子学方面的研究。Email: zqhuang@uestc.edu.cn

通讯作者: 汪相如(1983-), 男, 副教授, 博士, 主要研究方向为液晶光电子学、激光通信、激光合束。Email: xiangruwang@uestc.edu.cn

those methods in the past. This paper provides a theory basis for researches in the field of LC microwave devices.

Key words: distribution of dielectric anisotropy; LC microstrip line; S-parameter; COMSOL simulation

0 引言

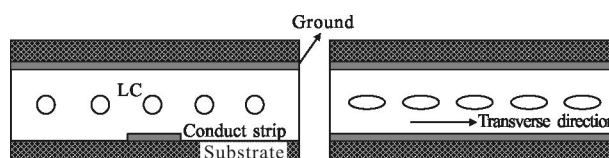
随着无线通信系统的发展,工作频率连续可调的微波毫米波器件已经受到越来越多的关注。目前的频率调节技术主要有以下 3 类^[1]:(1) 机械驱动,(2) 集成电子器件,(3) 可调材料。最常用且实用的机械驱动技术是电磁、压电、液压/气动以及微驱动,比如 MEMS。另外,集成电子调节器件则是通过 PIN 二极管、MEMS 开关、场效应晶体管(FETs)开关、光电开关以及变容二极管实现的。这些微波及毫米波开关的主要缺点是其非连续调节或低品质因数,尤其在高频段难以量产。第三种获得调频的方法是采用可调材料。这里,通过外加电场调节特定材料的介电常数或透过率,不管是电或磁通常都能得到连续频率调节。最常用的可调材料是铁氧体、铁电体及半导体。相比于其他频率可调材料,液晶具有损耗小、驱动电压低等诸多优点,并且能满足低介电常数的要求。由于液晶的各向异性特性,近年来国际上报道了大量采用液晶介电调制技术的各种微波器件的理论和实验研究^[2],包括:滤波器、移相器、天线^[3]和频率选择面等。2000 年以后,液晶显示产业急剧发展的同时,液晶的微波光电子器件也展现快速发展。2002 年德国的 Weil C 等人提出一种倒置微带线(IMSL)结构的液晶可调移相器,实现了 18 GHz 附近一定偏压下约 53°的相移差^[4]。2009 年德国的 Goelden F 等人采用 MEMS 工艺制成的液晶可调移相器实现在 20 GHz 处每 1 dB 插入损耗产生 60°的相位差^[5]。2012 年美国 Yu. Garbovskiy 等人发表的论文表明其 IMSL 液晶移相器实现在 110 GHz 处 0~300°的移相^[6]。在液晶微波器件的模型研究方面,针对液晶分子指向矢的非均匀分布对器件性能的影响的研究还少有提及。由于液晶分子指向矢的非均匀分布导致其有效介电常数也是各向异性非均匀分布的,而目前的研究笼统地将液晶材料的介电常数作为一个常数处理,忽略了介电各向异性分布,其结果与实际情况存

在较大偏差。2011 年马德里理工大学的 G. Perez-Palomino 等人给出液晶各向异性和非均匀性的电磁模型^[7],通过将液晶有效介电值分布非均匀的区域划分为几个对称区域,每个区域内则视为均匀分布,受到仿真工具的限制,不均匀区数太少,在求窄带最低点的谐振频率时仍然具有很大的局限性。

文中基于液晶连续弹性体理论,计算得到液晶的介电各向异性的精确分布结果,并以此建立液晶微带线模型。采用 COMSOL 多物理场数值分析工具进行微带线模型下的模场和传输参数的研究。并且将传统液晶微波器件研究方法和文中提出的精确分析方法进行对比,指出传统方法的误差。

1 液晶微带线模型的建立

液晶微带线采用倒置微带线(IMSL)结构,液晶作为工作介质,导带印制在液晶盒的下基板上,如图 1 所示。作为一种平面传输线,微带线宽度为 W ,介质厚度为 d ,其相对介电常数为 ϵ_r 。由于介质厚度 d 很小,通常将其场解近似为 TEM 场。上下基板均进行沿面取向,其方向均平行于微波传输的方向,液晶分子的初始状态为水平方向。



(a) 横截面图 (b) 左视图
(a) Cross section view (b) Left view

图 1 液晶微带线模型示意图

Fig.1 Schematic diagram of microstrip line with LC

对于给定的特征阻抗 Z_0 和介电常数 ϵ_r , 导带宽度 W 和介质厚度 d 的关系由以下表达式决定^[8]:

$$\frac{W}{d} = \begin{cases} \frac{8e^A}{e^{2A}-2}, & W/d < 2 \\ \frac{2}{\pi} \left[B-1-\ln(2B-1)+\frac{\epsilon_r-1}{2\epsilon_r}C \right], & W/d > 2 \end{cases} \quad (1)$$

其中,

$$C = \ln(B-1) + 0.39 - \frac{0.61}{\epsilon_r}$$

$$A = \frac{Z_0}{60} \sqrt{\frac{\epsilon_r+1}{2} + \frac{\epsilon_r-1}{\epsilon_r+1} \left(0.23 + \frac{0.11}{\epsilon_r}\right)}, B = \frac{377\pi}{2Z_0\sqrt{\epsilon_r}}$$

公式(1)表明要满足传输线的阻抗匹配条件,介质的相对介电常数 ϵ_r 、导带宽度 W 和介质厚度 d 是 3 个主要的决定因素。液晶的等效介电常数与液晶所处的电场以及位置都有关,涉及到液晶的折射率椭球原理和连续弹性体理论。

2 液晶的介电各向异性仿真原理

由于液晶的力学、光学和电学性质具有各向异性的特点,其相对介电常数是一个张量 $\vec{\epsilon}$,用 $\epsilon_{//}$ 、 ϵ_{\perp} 分别表示液晶分子长轴方向和短轴方向的介电分量。

当在垂直方向施加一定偏压时,水平方向的液晶分子会发生偏转,其偏转方向倾向于使分子指向矢与电场方向平行,如图 2 所示。在零电压条件下,

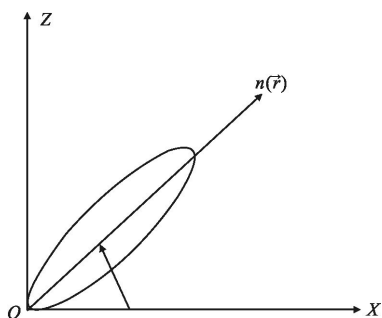


图 2 电场中液晶分子指向矢示意图

Fig.2 Schematic diagram of LC molecule directions in electric field

液晶对波束产生的有效折射率为非寻常光折射率,有效介电值 $\epsilon_{\text{eff}} = n_e^2$,若电压由 0 增大到某一足够大值,液晶分子则由平行于波束的方向偏转到垂直于波束的方向,其有效的介电张量的值 ϵ_{eff} 由 ϵ_{\perp} 逐渐增大到 $\epsilon_{//}$ 。中间状态的液晶分子其有效介电值可以根据晶体的折射率椭球理论^[9]来进行分析。当一束波与液晶的光轴成 θ 角入射时, o 光和 e 光的折射率分别为:

$$\frac{1}{n_e^2} = \frac{\cos^2\theta}{n_{\perp}^2} + \frac{\sin^2\theta}{n_{//}^2} \quad (2)$$

$$n_o = n_{\perp}$$

其中 $n_{//} = \sqrt{\epsilon_{//}}$, $n_{\perp} = \sqrt{\epsilon_{\perp}}$ 。进而有:

$$\epsilon_{\text{eff}}(\theta) = \frac{n_{//}^2 \cdot n_o^2}{n_{//}^2 \cos^2\theta + n_o^2 \sin^2\theta} \quad (3)$$

可以看到,这里 ϵ_{eff} 是与入射波束及液晶的光轴,即分子长轴方向之间的夹角 θ 有关的。而 θ 是受电压大小控制的。

用 $\Delta\epsilon$ 来表示一定电压下介电各向异性的改变量,这里 $\Delta\epsilon = \epsilon_{\text{eff}} - \epsilon_{\perp}$,显然 $0 \leq \Delta\epsilon \leq \epsilon_{//} - \epsilon_{\perp}$ 。图 3 所示为一种型号为 YM8 的向列型液晶其 $\Delta\epsilon$ 与电压的关系,该液晶材料的高频介电参量分别为 $\epsilon_{\perp} = 2.32$, $\epsilon_{//} = 3$ 。图中标出的阈值电压表示液晶的起偏电压,达到阈值(约为 0.5 V)后,液晶分子开始偏转。

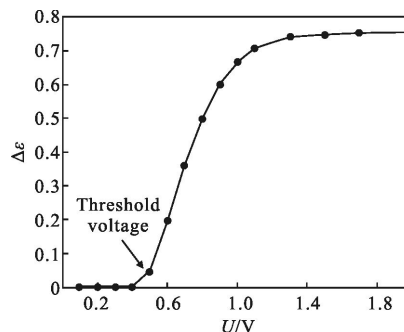


图 3 YM8 液晶介电各向异性 $\Delta\epsilon$ 与电压 U 的关系

Fig.3 Relationship between dielectric anisotropy $\Delta\epsilon$ and the voltage U of YM8

当将液晶置于具有一定分布特性的电场中,液晶分子的指向矢随不同位置电场变化而变化,即分子倾角 θ 在垂直于入射波方向的截面内具有非均匀分布特性。精确而高效地对液晶指向矢进行计算是研究液晶器件的关键之一。根据液晶的连续弹性体理论,液晶分子指向矢与位置及电位的关系应使其总的自由能最小。因此,可以通过令自由能最小来求解指向矢与位置及电压的关系。对于向列型液晶,其指向矢即分子长轴的方向。用向量 $\vec{n}(\vec{r})$ 来代表位置 \vec{r} 处液晶的指向矢,在外加电场下向列型液晶的自由能密度的具体表达式为^[10-11]:

$$f(\vec{r}) = \frac{1}{2} \{ k_{11} [\nabla \cdot \vec{n}(\vec{r})]^2 + k_{22} [\nabla \times \vec{n}(\vec{r})]^2 + k_{33} [n(\vec{r}) \times \nabla \times n(\vec{r})]^2 \} - \frac{1}{2} \Delta\epsilon (\vec{E} \cdot \vec{n}(\vec{r}))^2 \quad (4)$$

式中: k_{11} 、 k_{22} 和 k_{33} 分别代表液晶的展曲、扭曲和弯曲弹性系数。

通过欧拉公式将 $f(\vec{r})$ 的变分问题转化为微分方程可得如公式(5)所示的欧拉方程组:

$$\begin{cases} \frac{\partial f}{\partial \theta} - \frac{d}{dx} \left(\frac{\partial f}{\partial x} \right) - \frac{d}{dz} \left(\frac{\partial f}{\partial z} \right) = 0 \\ \frac{\partial f}{\partial V} - \frac{d}{dx} \left(\frac{\partial f}{\partial x} \right) - \frac{d}{dz} \left(\frac{\partial f}{\partial z} \right) = 0 \end{cases} \quad (5)$$

解该方程便得到微带线模型下液晶分子倾斜角 θ 随位置和电位的分布,进而根据公式(3)得到介电各向异性有效值的分布。

上述方程组进行直接求解是十分复杂的,文中采用 Matlab 差分迭代法根据公式(4)、(5)和(3)依次计算出 ϵ_{eff} 分布,通过 COMSOL[®]和 Matlab 互连来将液晶的有效介电常数 $\epsilon_{\text{eff}}(\theta)$ 传递给 COMSOL 中已建好的微带线模型。再利用 COMSOL 射频模块的混合模波应用模式仿真得到该微带传输线的电磁场模式解和传输常数 β 。该过程可以用图 4 所示流程图具体表示。

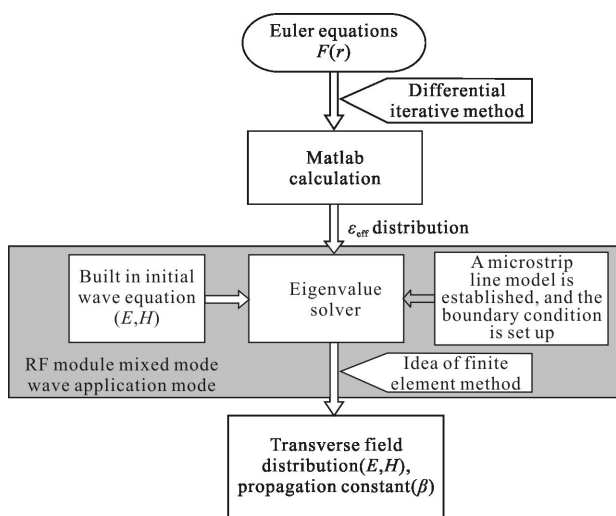


图 4 文中的研究方法和过程

Fig.4 Researching method and process of this paper

COMSOL 内部已具备初始的波动方程,在建立了相应的微带线模型并设置了与实际相符的边界条件后,可以选择特征值求解器进行求解,具体的求解过程是软件内部核心,即有限元法进行的过程。

3 模场解和 S 参量仿真结果

3.1 液晶的介电各向异性分布

根据液晶盒的实际结构给出具体的边界条件及

合适的初始条件,采用差分迭代法对方程组进行数值求解。模型所采用的液晶盒厚为 100 μm ,液晶材料型号为 YM8。

图 4 为 Matlab 仿真得出的 1 V 电压下微带线截面指向矢倾斜角 θ 的分布示意图。可以看到:指向矢倾斜角 θ 在电极下中心区域接近垂直,基本偏转到与电场一致的方向(由于仿真的是理想情况下,实际情况的液晶分子要偏转到电极方向往往需要不止 1 V 的电压),而边界处靠近电极位置分子基本未发生偏转,这是由于给液晶盒的基板取向是一种强锚定条件。从中心区域到四周 θ 逐渐过渡到边界值。COMSOL 模型中相应的 ϵ_{eff} 的分布如图 5 所示,有效介电常数在电极下方的中心区域达到最大值 3,接近介电平行分量 $\epsilon_{//}$,没有达到 $\epsilon_{//}$ 是因为 1 V 电压并没有让中心液晶分子完全偏转达到垂直状态,而四周则逐渐减小到初始状态的 ϵ_{\perp} 。

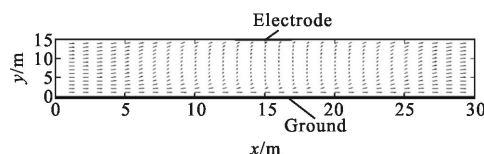


图 5 液晶指向矢倾斜角横截面分布图

Fig.5 Distribution map of LC orientation in the cross section

3.2 液晶微带线的模场解

以初始状态的 ϵ_{\perp} 为 ϵ_{eff} ,根据公式(1)所得的结构参数(导带宽 W 和介质厚度 d)进行 COMSOL 二维电磁场模型的建立(不计导带和接地板的厚度)。再代入 Matlab 仿真所得的 $\epsilon_{\text{eff}}(\theta)$ 分布,用特征值求解器进行垂直混合模波的模式计算,可以得到对应的模式分布结果。图 6(a)是未施加电场时的本征模,在施加 1 V 电压作用下的电场模式如图 6(b)所示。

对比图 6(a)和 6(b),电场模值在有效介电常数 ϵ_{eff} 较大的地方发生水平方向上一定程度的凹陷,但基本保持了不加电压(均匀介质)情况下的分布规律。图中 $n_{\text{eff_rfw}}$ 表示有效模式因子,传播常数等于其实部与自由空间波数 k_0 之积,其值由 $2.45k_0$ 增大到 $2.58k_0$ 。此外,施加电压后能量更加集中地分布在导带附近。由于在外加电场的作用之下,液晶分子的转动,使得中心区域的有效介电常数更大,而边界的介电常数更小,形成一定分布特征的介电常数,促使电场趋近于集中在边界上。

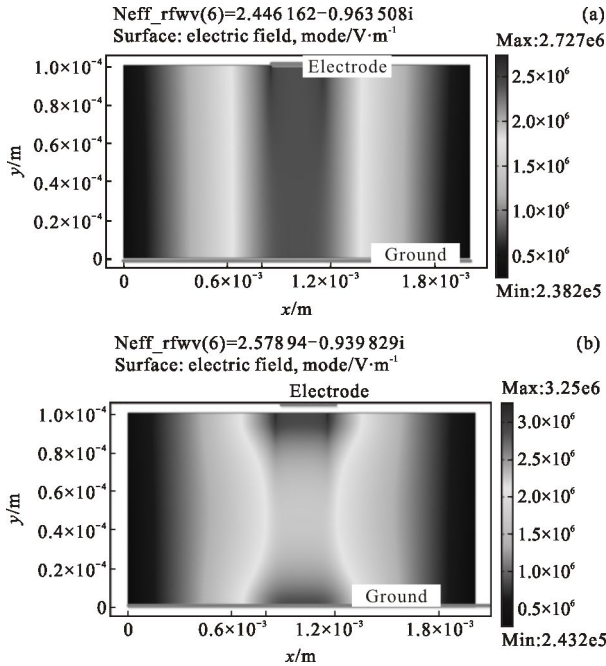


图 6 微带线横截面等效介电值分布图

Fig.6 Distribution of effective dielectric in the microstrip cross section

3.3 液晶微带线的传输特性

建立液晶微带线的三维模型,如图 7 所示,分别设置端口 1、2 为微波信号的输入、输出端口。外层为假设的空气环境,液晶层厚度为 100 μm 。为了研究介电各向异性分布对微带线传输特性的影响,用参数求解器对该模型进行 1~100 GHz 范围内扫频,分别计算 3 种情况下的 S 参数:(1) 初始状态,即不加电压的情况,液晶有效介电常数全部为垂直分量 ϵ_{\perp} ;(2) 分布状态,液晶介电值横向分布为图 5 所示;(3) 现有文献中的做法:全偏状态,即认为在给液晶上下基板间施加一定电压后整个横向截面内液晶的有效介电常数均为平行分量 ϵ_{\parallel} 。将 3 种情况的计算结果进行对比。

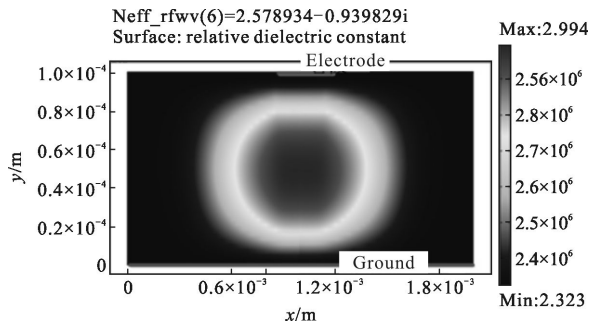


图 7 微带线横向模场分布仿真图

Fig.7 Simulation result of mode distribution of microstrip line

传输线传输系数 S21 见图 8(a),由于该模型仿真的条件较为理想,忽略了电导体和介质等引起的损耗,故传输线整体插入损耗较小,均在 0.4 dB 以下。此外,可以看到在有偏压情况下插入损耗比无偏压时更小,分布状态与全偏状态相差不大,但分布状态的传输线在低频段插损稍小,在高频段插损则稍大一些。

图 8(b)为 3 种情况下 S11 的仿真结果,可以看到:存在偏压时,回波损耗总体减小,而分布状态的回波损耗最小。此外,外加电压使得微带传输线的谐振频率向低频段发生移动。图中 A、B、C 点分别表示 3 种情况下回波损耗最低点的频率,其横坐标分别为 97 GHz、85.3 GHz、87.7 GHz。当电极上施加的调制电压由 0 连续地增大到某一最大值,微带线横切面中心的等效介电常数按照图 3 所示的关系由 ϵ_{\perp} 连续地过渡到 ϵ_{\parallel} ,同理谐振频率由图 8(b)中的 A 点连续地移动到 B 点。此外,介电各向异性在 1 V 电压下的分布可以实现 9.3 GHz 的频率偏移,相比于传统研究方法中直接以 ϵ_{\parallel} 作为施加 1 V 电压后液晶层整体的有效介电常数其频移相差 2.4 GHz (如前所述),这说明将加电压后的介电值的非均匀分布忽略而直接代以均匀介电常数 ϵ_{\parallel} 是存在误差的,对液晶在微带线中的分布状态的精确研究具有相当的重要性。

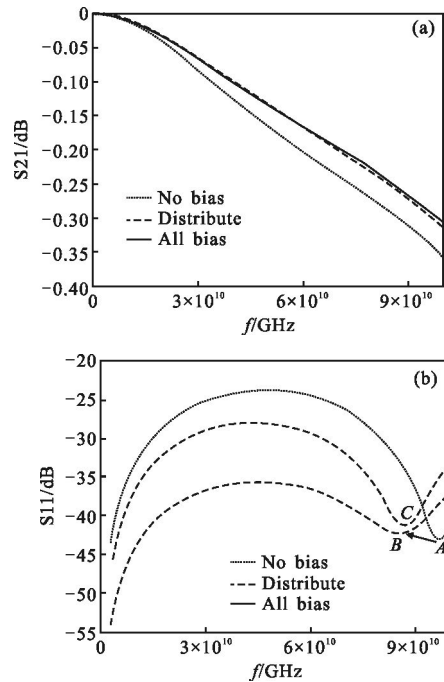


图 8 S 参数对比图

Fig.8 Comparison of S-parameter

4 结 论

文中建立了一个以液晶为工作介质的微带线模型, 根据液晶的连续弹性体理论得出其介电各向异性分布结果, 继而利用仿真软件模拟分析微带线的横向模场和传输参数, 仿真结果表明: 介电各向异性分布能降低微带传输线的回波损耗。此外, 仿真研究了一定范围内变化的偏置电压对微带线 S 参数及谐振频率的影响, 结果表明: 随着外加偏压的连续增大, 液晶有效介电常数的连续调整是可以实现的, S 参数变化甚小, 可以忽略不计。对比传统文献中方法所得结果, 文中的方法修正谐振频率误差 2.4 GHz。综上所述, 液晶材料作为频率可调材料其调制特性是随电压连续变化的, 这表明液晶在可调微波器件中的应用具有很大的潜力。

参考文献:

- [1] Petosa A. An overview of tuning techniques for frequency-agile antennas [J]. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 2012, 5(54): 271–296.
- [2] Yaghmaee P, Karabey O H, Bates B, et al. Electrically tuned microwave devices using liquid crystal technology [J]. *International Journal of Antennas and Propagation*, 2013, 2013: 824214.
- [3] Karabey O H, Gaebler A, Strunck S, et al. A 2-D electronically steered phased-array antenna with 2×2 elements in LC display technology [J]. *Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions on*, 2012, 60(5): 1297–1306.
- [4] Weil C, Luessem G, Jakoby R. Tunable inverted-microstrip phase shifter device using nematic liquid crystals [C]//MTT Microwave, MTT-S International Symposium, 2002, 1: 367–371.
- [5] Goelden F, Gaebler A, Karabey O, et al. Tunable band-pass filter based on liquid crystal [C]//German Microwave Conference, 2010, 2010: 98–101.
- [6] Garbovskiy Y, Zagorodnii V, Krivosik P, et al. Liquid crystal phase shifters at millimeter wave frequencies [J]. *Journal of Applied Physics*, 2012, 111(5): 054504.
- [7] Perez-Palomino G, Encinar J A, Barba M. Accurate electromagnetic modeling of liquid crystal cells for reconfigurable reflectarrays [C]//Proceedings of the 5th European Conference on Antennas and Propagation, 2011: 997–1001.
- [8] Pozar D M. *Microwave Engineer* [M]. Beijing: Electronics Industry Press, 2006. (in Chinese)
- [9] Huang Ziqiang. *The Principle of Liquid Crystal Display* [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2008. (in Chinese)
- [10] Liu Zhengyun, Jin Weiqi, Gao Jiaobo. Parameters design and electro-optical performance analysis for IR LCLV [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(4): 52–56. (in Chinese)
- [11] Mou Fangdi, Li Jun, Huang Ziqiang. Molecule directors two-dimensional distribution simulation and characteristics research of liquid-crystal blazed grating [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2013, 28(1): 79–84. (in Chinese)