

50 Hz 交流电控制的可变焦液体透镜

陈陶 梁忠诚 徐荣青

(南京邮电大学光电工程学院 微流控光学技术研究中心, 江苏 南京 210003)

摘要 研究了采用“金属导电基底/Parylene 介电层/Teflon 疏水层”透镜内芯材料的介电上电润湿(EWOD)特性。实验获得了导电液滴分别在直流电(DC)和 50 Hz 交流电(AC)控制下的接触角随电压变化的曲线。实验结果表明,为达到 DC 电源控制下的液滴的 EWOD 相同效果,使用低频的 AC 电压应考虑其瞬时最大值而不是有效值(均方根值)。目前已经制作出基于 50 Hz 交流电控制的 50 Hz 交流电控制的可变焦液体透镜并进行加电压变焦实验。给出了该液体透镜的焦距与电压之间的变化曲线,实验结果与上述分析一致。

关键词 测量;液体变焦透镜;交流电;低频;瞬时最大值

中图分类号 O439 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP49.041201

Variable-Focus Liquid Lens Controlled by 50 Hz AC Electric Field

Chen Tao Liang Zhongcheng Xu Rongqing

(Center of Optofluidic Technology, College of Optoelectronic Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing, Jiangsu 210003 China)

Abstract The property of electrowetting on dielectric (EWOD) on the core-surface of variable-focus liquid lens with specific “conductive metal/insulation film/hydrophobic” material is one of the important research topics in optofluidics. Contact angle versus applied voltage (DC and AC) curve of conductive liquid droplets is obtained by experiment. Experimental results show that, to achieve the same effect as that obtained with DC power, what should be considered is the instantaneous maximum rather than the effective value (root-mean-square) when using low-frequency AC voltage. The variable-focus experiment of the variable-focus lens under the applied 50 Hz AC voltage is performed. A curve between the focal length of the variable-focus lens and the applied voltage is given. The experiment result agrees very well with the above analysis.

Key words measurement; variable-focus liquid lens; AC; low frequency; instantaneous maximum

OCIS codes 120.1880; 080.3630; 350.3950; 350.4600

1 引言

电湿效应是一种物理化学现象,它通过在固体-液体界面加一定的外部电压来增加液体对固体的湿润程度,从而改变液体和固体的接触角。在现代光学变焦系统中,基于电湿效应的液体变焦透镜以其突出的性能而越来越受到人们的重视。这种通过外加电压改变液面曲率来实现变焦的透镜无机械可动部件、结构紧凑小巧、价格低、响应速度快、功耗小、寿命长、成像质量好,具有广阔的应用前景^[1]。

现今研究液体变焦透镜的电源主要以直流(DC)电源和较高频(约 1 kHz)交流(AC)电源为主^[2],由于要达到较大的变焦范围,电源的变压范围往往要达到上百伏,这样电源的成本就较高。本文以家庭普通的 50 Hz 电源(AC)研究了透镜内芯材料的介电上电润湿(EWOD)特性并与 DC 电源作用下的效果相比较,进而实验研究了基于 50 Hz 电压源的变焦液体透镜的变焦规律。研究表明,在此低频交流电场作用下,对电润湿效应起作用的是 AC 电压的瞬时最大值而不是其有效值[均方根(RMS)值]。

收稿日期: 2011-08-02; 收到修改稿日期: 2011-09-10; 网络出版日期: 2012-01-07

基金项目: 国家自然科学基金(60878037, 60977069)和江苏省自然科学基金(BK2009424)资助课题。

作者简介: 陈陶(1974—),男,博士研究生,主要从事微流控方面的研究。E-mail: chent@njupt.edu.cn

导师简介: 梁忠诚(1958—),男,博士,教授,主要从事信息光学、微流控光学等方面的研究。E-mail: zliang@njupt.edu.cn

2 直流和交流电压控制下的 EWOD 实验对比

2.1 实验原理

图 1 是一个典型的液滴电湿效应装置示意图。图中用虚线标明的导电液滴为未加电压时形状,此时液体与绝缘层之间的接触角为 θ_0 ,而在施加一定电压后,导电液滴与绝缘膜层的接触角变小,液滴变化为实线标明的形状。根据杨氏方程^[3]可知

$$\cos \theta(V) = \cos \theta_0 + \frac{\epsilon_0 \epsilon_r V^2}{2\gamma_{lg} d}, \quad (1)$$

式中 ϵ_r 和 d 分别为绝缘介电层的相对介电系数和厚度, γ_{lg} 为液体与空气间的界面张力。

2.2 实验装置

实验采用材料包括体积电阻率为 $100 \Omega/\text{mm}$ 的 ITO 玻璃。质量分数为 10% 的 NaCl 溶液,体积分数为 1% 的 Teflon(AF1600)及派瑞林(Parylene N)。使用的器件和设备包括 DMJ-LI 型 Parylene 真空涂敷设备,烘干箱,金属探针,匀胶机,最小刻度为 $1 \mu\text{L}$ 的移液器,带有 CCD 的数字显微镜(DH-HV2002UC,相当于 10 倍目镜,分辨率为 $1600 \text{ pixel} \times 1200 \text{ pixel}$,像素尺寸为 $4.2 \mu\text{m} \times 4.2 \mu\text{m}$,显微镜物镜的放大倍率为 5 倍),照明光源及计算机。

绝缘膜层 Parylene N 的镀膜采用成熟的低压化学沉积工艺(LPCVD)。首先在 $150 \text{ }^\circ\text{C}$ 的蒸发腔内将固态粉末状 Parylene 加热升华,然后进入裂解腔,经 $680 \text{ }^\circ\text{C}$ 高温将两个氨基键裂解,形成一种不稳定的气态二价自由基,最后自由基进入真空沉积室($25 \text{ }^\circ\text{C}$)在基材表面冷凝聚合成一层厚度均匀、透明并且连续的高聚物薄膜。将基片浸泡在配置好的溶液(去离子水,双氧水,氨水体积比为 5:2:1)中超声波清洗 30 min,再用去离子水反复冲洗干净。在真空沉积镀膜前放置于烘干箱内进行预烘,并打开抽风机进行风干,使其表面保证干燥。开启自动开关,设定各项工艺系数,在室温下沉积一层 Parylene 涂层。本实验中 Parylene N 的厚度为 $5 \mu\text{m}$ 。疏水膜层 Teflon 采用旋涂法制备,匀胶机设定 1500 r/s 的速度、时间 50 s。使用光谱法测量其厚度约为 100 nm。

2.3 实验对比与讨论

在 $5 \mu\text{m}$ 厚的 Parylene N 上旋涂一层体积分数为 1% 的 Teflon AF 1600,然后放入烘干箱中,在 $110 \text{ }^\circ\text{C}$ 预加热 10 min 后,再在 $170 \text{ }^\circ\text{C}$ 加热 10 min。用移液器在疏水层表面滴 $5 \mu\text{L}$ 质量分数为 10% 的 NaCl 溶液,两电极间加上 $0 \sim 120 \text{ V}$ 的直流或交流电压。当导电液滴上施加不同的电压时,液滴的形状随之发生变化。通过带有 CCD 的显微镜获取液滴变化图像,通过 Matlab 的图像处理工具对 CCD 采集的照片进行图像处理,计算出液滴与样品表面的接触角,如图 2 所示。从图 2 可以看出,在直流电场情况下,接触角随电压的实验变化情况与理论相符合。但在 50 Hz 交流电场作用下,与其有效值(RMS)相同的直流电场相比,前者接触角随电压变化比后者明显得多。此前许多学者在研究交流电场对液滴 EWOD 效应的实验中并未讨论此现象^[4,5]。将交流电压与接触角实验关系曲线和直流电压的 1.414 倍(即交流电压的瞬时最大值)与接触角理论关系曲线对比,发现两者符合得相当好。考虑到液体电湿效应响应时间较小^[6],在低频交流电场作用下,交流电压的瞬时最大值应对电湿效应起决定性作用。

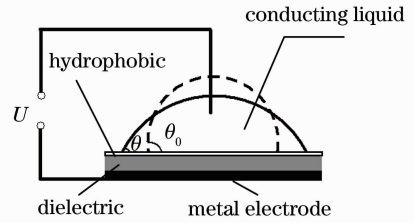


图 1 电湿效应示意图

Fig. 1 Schematic of electrowetting effect

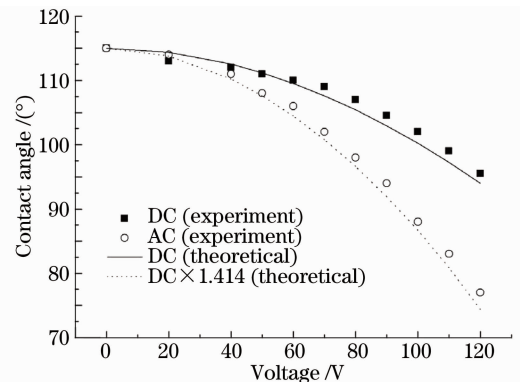


图 2 电压特性曲线

Fig. 2 Voltage characteristics curve

3 50 Hz 交流电压控制下变焦液体透镜实验与讨论

以圆柱型双液体变焦透镜为例,进行 50 Hz 交流电压控制下的实验。透镜结构如图 3 所示。液体变焦

透镜采用金属铜作为圆柱管的材料,金属圆筒半径2 mm。在圆柱管内壁镀有一层绝缘介电层(5 μm 的 Parylene N),在其外旋涂有疏水层(小于1 μm 的 Teflon AF1600)。往圆柱管中注入两种透明且互不相溶的液体,一种为绝缘的非极性液体(甲基硅油或溴代十二烷),另一种为导电的水溶液。圆柱管的两边分别用导电 ITO 玻璃片和盖玻片密封。按照图 3 所示的方式将液体变焦透镜连接在 50 Hz 的市电电源上。

首先测出液体变焦透镜在电压为 0 时的焦距,然后外加交流电压,每升高 5 V 测一次液体变焦透镜的焦距值,持续加电压到 90 V。实验中焦距仪的测量范围为 ± 150 mm,50~70 V 之间大于测量范围的焦距值无法直接测量。最后将所测得的所有点相连可以得到如图 4 所示的曲线。为方便讨论,图中作出实线为加直流电压(即交流电压的 RMS)的理论值,虚线为用直流电压的1.414 倍即对应交流电压的最大值计算出的理论值。由图 4 可见,在低频交流电场作用下,对液体变焦透镜而言,其焦距取决于交流电压的瞬时最大值而不是 RMS 值,究其原因可能是由于液体粘滞性的影响,其影响机制还有待进一步研究。若要达到相同的变焦效果,对透镜所施加的直流电压要比交流电压大得多,如图 4 实线所示。

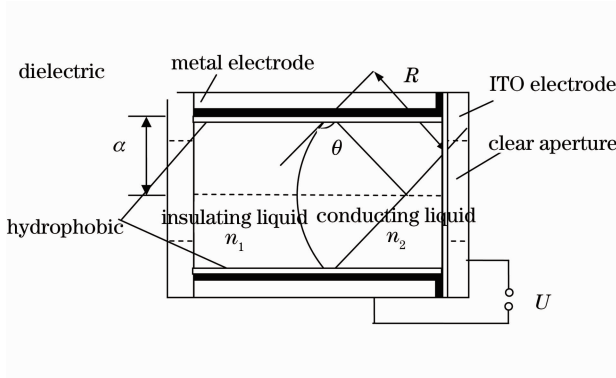


图 3 液体变焦透镜的结构示意图

Fig. 3 Cross section view of the liquid variable-focus lens

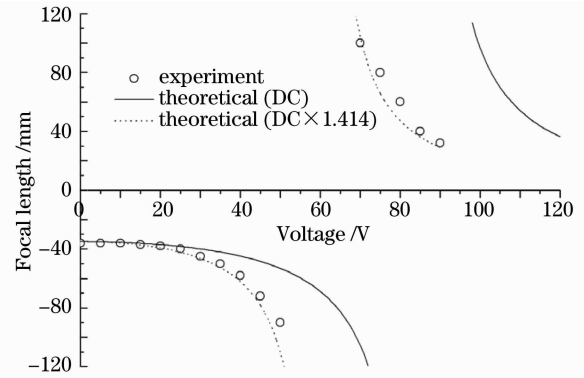


图 4 液体变焦透镜的焦距与电压关系曲线

Fig. 4 Focal length versus applied voltage for variable-focus lens

4 结 论

本文对采用“金属导电基底/Parylene 介电层/Teflon 疏水层”透镜内芯材料上的液滴进行了 EWOD 特性研究。通过实验研究了液滴分别在直流电和 50 Hz 交流电控制下接触角随电压变化的曲线。实验结果表明,在 50 Hz 交流电场作用下,与其有效值(RMS)相同的直流电场相比,前者液滴接触角随电压变化比后者明显得多。进一步研究发现,在低频交流电场作用下,使用交流电压的瞬时最大值代替其有效值(RMS)讨论上述关系,曲线与理论值较吻合。考虑到液体电湿效应响应时间较小,在低频交流电场作用下,交流电压的瞬时最大值应对电湿效应起决定性作用。在此基础上制作出基于 50 Hz 交流电控制的可变焦液体透镜并进行加电压变焦实验。给出了透镜焦距与低频交流电压的关系曲线,实验验证了低频交流电压作用下液体变焦透镜的焦距取决于其瞬时最大值而不是有效值(RMS)。

参 考 文 献

- 1 S. Kuipera, B. Hendriks. Variable-focus liquid lens for miniature cameras[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2004, **85**(7): 1128~1130
- 2 Uriel Levy, Romi Shamai. Tunable optofluidic devices[J]. *Microfluid. Nanofluid.*, 2008, **4**(1-2): 97~105
- 3 F. Mugele, J. C. Baret. Electrowetting: from basics to applications[J]. *J. Phys. Condens. Matter*, 2005, **17**(28): R705~R774
- 4 T. B. Jones, K. L. Wang. Frequency-dependent electromechanics of aqueous liquids: electrowetting and dielectrophoresis [J]. *Langmuir*, 2004, **20**(7): 2813~2818
- 5 Jin Seok Hong, Sung Hee Ko, Kwan Hyoung Kang. A numerical investigation on AC electrowetting of a droplet[J]. *Microfluid. Nanofluid.*, 2008, **5**(2): 263~271
- 6 R. A. Hayes, B. J. Feenstra. Video-speed electronic paper based on electrowetting[J]. *Nature*, 2003, **425**(6956): 383~385