

doi:10.3788/gzxb20144302.0223003

## 双层介电薄膜结构双液体变焦透镜的研究

胡水兰, 彭润玲, 李一凡, 魏茂炜, 陈家璧

(上海理工大学 光电信息与计算机工程学院, 上海 200093)

**摘 要:**在双层介电薄膜结构双液体变焦透镜模型的基础上,分析了透镜焦距与外加电压、双层介电薄膜的介电常量、薄膜厚度等参量的关系.并以降低双液体变焦透镜驱动电压为目的,选择了相对介电常量较高的五氧化二钽薄膜作为内层介电层,相对介电常量较低的防水层为外层介电层,分析了双层介电薄膜的厚度以及厚度的匹配对双液体变焦透镜的变焦范围和驱动电压的影响,在保证一定的变焦范围并尽可能降低透镜驱动电压情况下获得最佳透镜工艺参量.模拟结果表明:疏水层薄膜厚度比高介电层薄膜厚度小很多时,双液体变焦透镜可实现低压驱动,且双液体变焦透镜在一定变焦范围内所需驱动电压可下降到 10 V 以下,而疏水层薄膜厚度与高介电层薄膜厚度相当或高于高介电层薄膜厚度都不能有效利用高介电薄膜的高介电性能来降低双液体变焦透镜的驱动电压.

**关键词:**双液体透镜; 低压驱动; 模拟分析; 变焦透镜; 介电常量; 双层薄膜; 接触角

**中图分类号:** O439; O435.2

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1004-4213(2014)02-0223003-4

## Research on the Double-liquid Lens with Double-layer Dielectric Films

HU Shui-lan, PENG Run-lin, LI Yi-fan, CHEN Jia-bi

(Engineering Research Center of Optical Instrument and System, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

**Abstract:** A relationship between the focal length of the double-liquid lens and other parameters such as the applied voltage, the dielectric constant of the double-layer dielectric film and the film thickness etc. was analyzed based on the cylindrical double-liquid lens model with double-layer dielectric film. And the tantalum pentoxide film with a high relative dielectric constant as an inter-layer dielectric layer and a relatively low dielectric constant for the outer dielectric layer which is a waterproof layer, were used to reduce the driving voltage of double-liquid variable-focus lens. The effects of the thickness of two dielectric films and the thickness matching relationship between them were described on the variable-focus range and the driving voltage of the double-liquid lens. The optimum film parameters were obtained on the condition of minimizing the drive voltage of the lens at a certain variable-focus range. Simulation results show that double-liquid lens can be driven by relatively low voltage when the waterproof film thickness is much thinner than that of the high dielectric constant thin film. Within a certain variable-focus range, the driving voltage of the double-liquid variable-focus lens can drop to 10 volts. But double-liquid lens will not make efficient use of the high dielectric property of the tantalum pentoxide film, if the thickness of waterproof film is equivalent to or higher than that of the high dielectric constant thin film.

**Key words:** Double-liquid lens; Low-voltage driving; Simulation analysis; Variable-focus; Dielectric constant; Double-layers; Contact angle

**OCIS Codes:** 230.3990; 080.3630; 120.4820; 310.6870; 310.6845

**基金项目:**国家自然科学基金(No. 11104184)、国家重点基础研究发展计划(No. 2011cb707504)、教育部博士点新教师类基金(No. 20111312012011)和上海市教育部委员会创新项目(No. 12YZ108)资助

**第一作者:**胡水兰(1988-),女,硕士研究生,主要研究方向为电湿效应、微型液体透镜及相关系统. Email:shuilan\_88@126.com

**导师(通讯作者):**彭润玲(1978-),女,副教授,博士,主要研究方向为电湿效应、微型透镜及相关系统. Email:pengrunling@gmail.com

**收稿日期:**2013-06-03; **录用日期:**2013-09-13

<http://www.photon.ac.cn>

## 0 引言

基于电润湿效应的双液体透镜是通过外加电压来调节液面的曲率,从而改变液体透镜的焦距.在现代光学透镜系统中,这种液体透镜有着其突出的优点,主要表现在无机械运动、结构小巧、价格低、响应速度快、寿命长、成像质量好等.因此可适用于内窥镜和拍照手机等便携设备,还可应用于光学和生物医学仪器等领域<sup>[1-2]</sup>.

随着人们对基于电润湿效应的双液体透镜的不断研究,驱动电压太高仍然是目前诸多介电层润湿效应(Electrowetting on Dielectric, EWOD)应用中碰到的问题,如何有效地降低 EWOD 的驱动电压成为该领域研究谈论的问题. Saeki<sup>[3]</sup>等人将 Teflon 薄膜减到 13 纳米后仅用 6 伏的电压就使接触角发生了改变,但是这么薄的薄膜很容易被击穿. Moon<sup>[4]</sup>等人报道在厚度为 70 纳米介电常量高的钛酸锶钡上涂覆一层 20 纳米的 Teflon,可以在 14 伏的电压下改变液滴的运动.随后 Yi fan Li<sup>[5]</sup>等人用五氧化二钽充当低压 EWOD 的绝缘层,将电压降到最低 6 伏,他不仅考虑到该介电层薄膜的介电常量相对较高,而且考虑到阳极氧化法过程生成的五氧化二钽薄膜的厚度小,且具有较小的表面粗糙度(仅为 0.6 nm). 2010 年, Yan-You Lin<sup>[6]</sup>等人也利用五氧化二钽薄膜获取了低到 7 伏左右的驱动电压.综上所述,高介电常量的五氧化二钽薄膜可以有效地降低驱动电压.

本文将高介电常量的五氧化二钽薄膜作为绝缘层薄膜应用于圆柱管型结构的双液体变焦透镜,但五氧化二钽薄膜并非疏水性材料,为了使双液体变焦透镜获得更高的变焦范围,还需要在五氧化二钽薄膜外层镀上一层防水层薄膜,另外此层薄膜初始接触角必须较大,通常采用派瑞林<sup>[7-8]</sup>、特氟龙<sup>[9-11]</sup>等.本文在此基础上介绍了一种圆柱管内壁具有双层介质薄膜的双液体变焦透镜模型,并对该模型给出了透镜的焦距与外加电压、两种介电薄膜的介电常量和薄膜厚度等参量的关系.通过模拟分析两种给定介电常量的介电薄膜的厚度对双液体变焦透镜在达到相同变焦范围时所需要的驱动电压的影响,从而得知当低介电常量介电薄膜的厚度大于高介电常量介电薄膜的厚度时,利用高介电常量的介电薄膜降低透镜驱动电压<sup>[4-5]</sup>的方法不可行;并且要有效利用高介电常量的介电薄膜来降低透镜的驱动电压,必须使外层介电常量较低的防水涂层的厚度尽可能小于高介电常量的介电薄膜厚度,而满足这个条件后,双液体变焦透镜在达到一定的变焦范围所需的驱动电压可以下降到 10 V 以下.

## 1 双层薄膜结构双液体变焦透镜的结构与原理

双层薄膜结构的双液体变焦透镜是利用高介电层薄膜(例如五氧化二钽薄膜)的高介电性能和疏水性薄膜的大初始接触角制成的变焦透镜,其结构如图 1 所示.本节结合图 1 和电润湿效应的杨氏方程推导出双液体变焦透镜的焦距与驱动电压、双层介电薄膜的介电常量以及厚度等的关系.

图 1 为双层薄膜液体变焦透镜的结构示意图.其结构为圆柱型双液体变焦透镜结构,双液体变焦透镜采用钽作为圆柱管材料,依次在圆柱管内壁镀上一层高介电常量层和一层疏水层,往圆柱管内依次注入两种不相容并透明的液体,其中液体 1 为导电液体,液体 2 为绝缘非极性液体,两种液体的折射率不同,但是具有相同的密度.折射率的不同是为了在液体曲率发生改变时液体透镜可以实现变焦功能;密度相同是为了确保模型结构不受方位的影响.

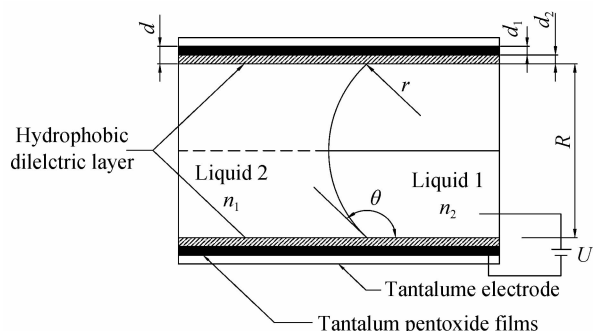


图 1 双层薄膜液体变焦透镜结构示意图

Fig. 1 Cross section view of double-liquid variable-focus lens with double layers

如图 1 所示,圆柱管内壁的内直径为  $R$ ,靠近圆柱管内壁薄膜为五氧化二钽薄膜,涂覆在五氧化二钽之上的是一层薄膜为疏水层薄膜.假设圆柱管内壁镀的高介电常量薄膜和疏水薄膜都为均匀薄膜,则导电液体与金属圆柱管可构成圆柱管电容器,双液体变焦透镜结构可看作一个双层的电容器,双层薄膜的电容器的电容相当于是两个电容器串联<sup>[12]</sup>,其内层电容器单位面积的电容  $C_1$  为

$$C_1 = \epsilon_0 \epsilon_1 / d_1 \quad (1)$$

式中  $\epsilon_0$ 、 $\epsilon_1$  分别为介质的真空介电常量和高介电层五氧化二钽介质的相对介电常量.  $d_1$  为高介电层五氧化二钽薄膜的厚度.外层电容器与内层电容器平行的单位面积电容  $C_2$  为

$$C_2 = \epsilon_0 \epsilon_2 / d_2 \quad (2)$$

式中  $\epsilon_2$  为疏水介质的相对介电常量.  $d_2$  为疏水层薄膜的厚度.假定双层薄膜的等效电容的厚度为  $d$ ,等效相

对介电常量为  $\epsilon$ , 则圆柱管双液体透镜的单位面积的等效电容  $C$  为

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon}{d} = \frac{C_1 \times C_2}{C_1 + C_2} = \frac{\epsilon_0 \times \epsilon_1 \times \epsilon_2}{\epsilon_1 d_2 + \epsilon_2 d_1} \quad (3)$$

另外双液体变焦透镜焦距的计算可得双液体变焦透镜的焦距  $f^{[13]}$  为

$$f = r / (n_2 - n_1) \quad (4)$$

式中的  $r$  为双液体球形界面的曲率半径,  $n_1, n_2$  分别为绝缘液体、导电液体的折射率. 由 Lippmann-Young 方程<sup>[14-15]</sup> 可知加电压后双液体变焦透镜的接触角与电压及初始接触角的关系为

$$\cos \theta = \cos \theta_0 + \frac{1}{2} C U^2 \quad (5)$$

式中  $\theta_0$  为未加电压时, 导电液体与疏水层薄膜之间的接触角,  $\theta$  为电极与导电液体之间加电压为  $U$  时导电液体与疏水层薄膜之间的接触角.

由图 1 几何关系可知

$$r = \frac{R}{\sin(\theta - 90^\circ)} = -\frac{R}{\cos \theta} \quad (6)$$

由式(3)~(6)可得

$$f = \frac{1}{\frac{n_1 - n_2}{R} \cos \theta_0 + \frac{\epsilon_0 \epsilon_1 \epsilon_2 (n_1 - n_2)}{2R\gamma_{12}(\epsilon_1 d_2 + \epsilon_2 d_1)} U^2} \quad (7)$$

## 2 模拟分析

透镜参量  $n_1 = 1.560 2$ ,  $n_2 = 1.394 0$ ,  $\theta_0 = 2\pi/3$ ,  $R = 3 \text{ mm}$ ,  $\epsilon_1 = 25$ ,  $\epsilon_2 = 2.500$ ,  $\gamma_{12} = 38.1 \times 10^{-3} \text{ N/m}$  等时, 通过 MATLAB 模拟分析高介电层五氧化二钽薄膜的厚度与疏水层薄膜的厚度在不同数量级情况下对双液体变焦透镜的驱动电压及变焦范围的影响, 探索高介电常量的介电薄膜能有效地用来降低双液体变焦透镜的驱动电压的途径, 获得低于 10V 以下驱动电压的双液体变焦透镜.

### 2.1 五氧化二钽薄膜的厚度对液体变焦透镜性能的影响

图 2 为  $d_1 \geq d_2$  情况下,  $d_1$  的厚度对双液体变焦透镜的变焦性能的影响, 其中(a)、(b)分别给出  $d_2 = 200 \text{ nm}$  且  $d_1, d_2$  数量级相当、 $d_1 \geq d_2$  情况下, 双液体变焦透镜焦距与驱动电压曲线关系. 如图 2(a)所示, 疏水层薄膜的厚度  $d_2$  为 200 nm, 高介电常量层薄膜的厚度  $d_1$  从 200 nm、400 nm、800 nm 变化时, 其双液体透镜分别在驱动电压为  $U = 19.464 0 \text{ V}$ 、20.329 5 V、21.958 4 V 时双液体的界面为平面; 图 2(b)给出  $d_2$  的值为 20 nm,  $d_1$  从 200 nm、400 nm、800 nm 变化时, 双液体变焦透镜分别在驱动电压为 8.299 5 V、10.164 7 V、13.122 6 V 时, 双液体透镜的双液体界面为平面; 结合图 2(a)、(b)可知, 当两个薄膜的厚度相当时, 介电常量大的薄膜厚度  $d_1$  的改变对驱动电压的影响很小, 而当

$d_1 \geq d_2$  时,  $d_1$  厚度的改变对驱动电压的影响变大, 且  $d_1$  的厚度越小, 达到相同变焦范围其驱动电压越低.

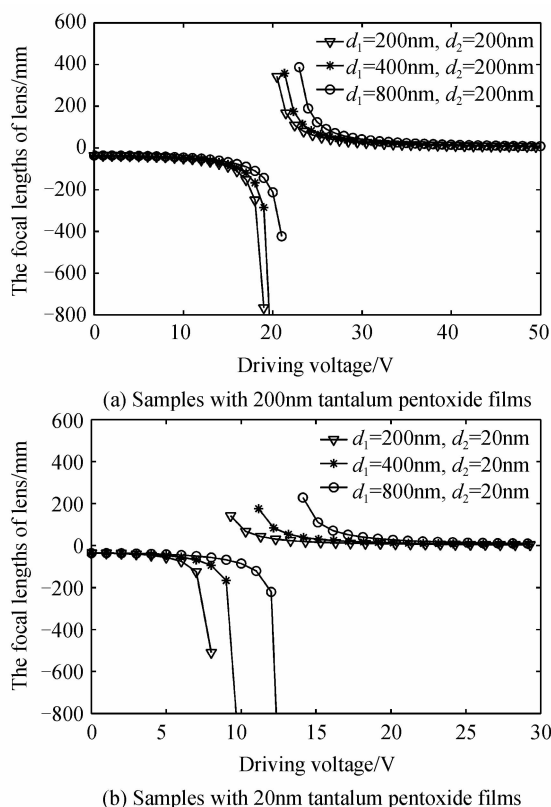


图 2  $d_1$  的厚度对双液体透镜焦距与驱动电压曲线的影响  
Fig. 2 Lens focal length versus dc voltage for hydrophobic layer samples (thickness 200, 400, 600, 800 nm) with 200 nm, 20 nm tantalum pentoxide film

### 2.2 疏水性薄膜的厚度对双液体透镜的性能影响

疏水性薄膜材料直接影响着初始接触角, 而疏水性薄膜的厚度的改变也会改变液体透镜焦距随电压变化曲线. 图 3 给出  $d_1 \leq d_2$  时,  $d_1$  与  $d_2$  在不同数量级的情况下,  $d_2$  的改变对双液体变焦透镜性能的影响, 其中图 3(a)、(b)分别给出  $d_1, d_2$  相当、 $d_1 \leq d_2$  情况下, 双液体变焦透镜焦距与驱动电压曲线关系. 图 3(a)中  $d_1$  为 200 nm, 疏水层薄膜厚度分别为 200 nm、400 nm、800 nm 变化, 当驱动电压分别为 19.464 0 V、26.893 4 V、37.577 5 V 时, 双液体透镜的焦距趋向无穷大, 此时双液体变焦透镜内的双液体曲面为一平面. 改变  $d_1$  的厚度, 设定为 20 nm, 同样改变疏水层薄膜的厚度, 获得双液体变焦透镜中双液体分界面为平面时的电压分别为 18.650 8 V、26.310 8 V、37.162 8 V, 如图 3(b)所示. 图 3 说明, 当  $d$  小于等于  $d_2$  时,  $d$  的改变对驱动电压的影响不明显, 而  $d_2$  厚度的改变对双液体变焦透镜焦距和驱动电压的曲线影响较大, 因而不能有效地利用  $\epsilon_1$  的大特点来降低电压; 另外  $d_1$  小于  $d_2$  时, 如果  $d_1$  与  $d_2$  总厚度一定, 双液体变焦透镜的驱动电压整体也会升高.

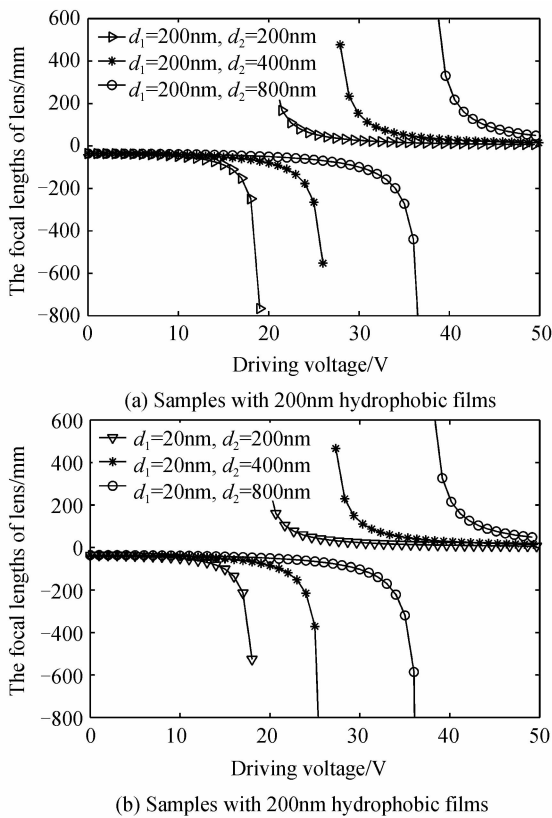


图3  $d_2$  的厚度对双液体透镜焦距与驱动电压曲线的影响  
Fig. 3 Lens focal length versus dc voltage for hydrophobic layer samples (thickness 200,400,600,800 nm) with 200 nm, 20 nm tantalum pentoxide film

### 3 结论

本文介绍了双液体变焦透镜的结构与原理,并利用光学理论以及圆柱管电容器电容方程推导出圆柱管型双液体变焦透镜系统的焦距与驱动电压、初始接触角以及双层薄膜的厚度和介电常量等的关系.本文给出高介电层薄膜的厚度大于等于疏水性薄膜的厚度和高介电层薄膜的厚度小于等于疏水性薄膜的厚度情况下,改变五氧化二钽薄膜的厚度或疏水层薄膜的厚度,模拟观察如何才能利用五氧化二钽薄膜的高介电常量来有效地降低双液体变焦透镜的驱动电压,并获得最佳双层薄膜结构的厚度参量,以实现 10 V 以下低压驱动电压的双层薄膜结构的双液体变焦透镜.模拟分析结果表明五氧化二钽薄膜的厚度远大于疏水性薄膜厚度时,五氧化二钽薄膜的厚度的改变对驱动电压的变化较大,且五氧化二钽薄膜的厚度越小,越能降低驱动电压;其次,疏水性薄膜的厚度对双层薄膜结构的圆柱管型双液体变焦透镜的影响较大,疏水层薄膜的厚度的增大会整体提高双液体变焦透镜的驱动电压,特别是疏水层薄膜的厚度大于高介电层薄膜的厚度时,不利于利用高介电层薄膜的高介电性能来降低驱动电压,因而实验应尽可能的降低疏水层薄膜的厚度;模拟结果显示五氧化二钽薄膜的厚度  $d_1$  为 200 nm,疏水层薄

膜的厚度  $d_2$  为 20 nm 时,双液体变焦透镜的双液体分界面为平面的驱动电压为 8.299 5 V,此模拟得的驱动电压已达到 10 V 以下,此情况下,双液体变焦透镜的介电薄膜的总厚度也在几百纳米区域,不会因为薄膜厚度太低而容易被击穿.

#### 参考文献

- [1] WANG Da-zhen, PENG Run-ling, CHEN Jia-bi, *et al.* Variable-focus hysteresis of double-liquid variable-focus lens [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(6): 87-91.  
王大振,彭润玲,陈家璧,等.双液体变焦透镜变焦迟滞现象的研究[J].*光学学报*, 2011, **31**(6): 87-91.
- [2] KRUPENKIN T, YANG S, MACH P. Tunable liquid microlens[J]. *Applied Physics Letters*, 2003, **82**(3): 316-318.
- [3] SAEKI F, BAUM J, MOON H, *et al.* Electrowetting on dielectrics (EWOD): reducing voltage requirements for microfluidics [J]. *Polymeric Materials Science and Engineering*, 2001, **85**: 12-13.
- [4] MOON H, CHO S K, GARRELL R L, *et al.* Low voltage electrowetting-on-dielectric[J]. *Journal of applied physics*, 2002, **92**(7): 4080-4087.
- [5] LI Y, PARKES W, HAWORTH L I, *et al.* Room-temperature fabrication of anodic tantalum pentoxide for low-voltage electrowetting on dielectric (EWOD)[J]. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2008, **17**(6): 1481-1488.
- [6] LIN Y Y, EVANS R D, WELCH E, *et al.* Low voltage electrowetting-on-dielectric platform using multi-layer insulators[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2010, **150**(1): 465-470.
- [7] PAPAGEORGIOU D P, TSEREPI A, BOUDOUVIS A G, *et al.* Superior performance of multilayered fluoropolymer films in low voltage electrowetting [J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2012, **368**(1): 592-598.
- [8] KAHOULI A, SYLVESTRE A, ORTEGA L, *et al.* Structural and dielectric study of parylene C thin films[J]. *Applied Physics Letters*, 2009, **94**(15): 152901-152901.
- [9] DHINDSA M, KUIPER S, HEIKENFELD J. Reliable and low-voltage electrowetting on thin parylene films[J]. *Thin Solid Films*, 2011, **519**(10): 3346-3351.
- [10] DUFOUR T, HUBERT J, VIVILLE P, *et al.* PTFE surface etching in the post-discharge of a scanning rf plasma torch: evidence of ejected fluorinated species[J]. *Plasma Processes and Polymers*, 2012, **9**(8): 820-829.
- [11] BARSHILIA H C, GUPTA N. Superhydrophobic polytetrafluoroethylene surfaces with leaf-like micro-protrusions through  $\text{Ar}^+ \text{O}_2$  plasma etching process [J]. *Vacuum*, 2014, **99**(1): 42-48.
- [12] 谢处方, 饶克谨. 电磁场与电磁波[M]. 4版. 北京: 高等教育出版社, 2006:91.
- [13] SHENG Jin-xia, PENG Run-ling, CHEN Jia-bi. Analysis on properties of the double-liquid zoom lens based on electrowetting[J]. *Optical Instruments*, 2007, **29**(4): 23-26.  
绳金侠, 彭润玲, 陈家璧. 电湿效应双液体变焦透镜性能的分析[J]. *光学仪器*, 2007, **29**(4): 23-26.
- [14] 腾新荣等. 表面物理化学[M]. 北京: 化学工业出版社, 2009:4.
- [15] KUIPER S, HENDRIKS B H W. Variable-focus liquid lens for miniature cameras[J]. *Applied Physics Letters*, 2004, **85**(7): 1128-1130.