

光电器件与材料·

基于介质上电润湿效应的液态场效应管

王跃庆, 赵 瑞, 刘 钊, 田志强, 华小刚

(南京邮电大学光电工程学院, 江苏 南京 210046)

摘 要: 用一片ITO玻璃作为场效应管的源极,在此玻璃上分别粘贴两块相同厚度塑料薄铝片作为栅极和漏极,在两块铝片之间留下很小的平行缝隙,再分别在源极、漏极、栅极的玻璃板上涂上聚四氟乙烯(Teflon)薄膜作为亲油疏水层,采用环氧树脂作为围堰材料,这样就制备了基于电润湿效应的新型液态场效应管。通过改变栅极的电压,能够调节有色油滴的位移,从而控制源极和漏极的电流变化。完成了液态场效应管的制作,并给出了初步的测试结果。

关键词: 电润湿;晶体管;疏水亲油层;环氧树脂

中图分类号:TN386

文献标识码:A

文章编号:1673-1255(2013)-01-0025-04

Liquid-state Field-effect Transistors Based on EWOD Effect

WANG Yue-Qing, ZHAO Rui, LIU Zhao, TIAN Zhi-Qiang, HUA Xiao-Gang

(School of Opto-electronic Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210046, China)

Abstract: A piece of ITO glass is used as the source electrode of a field-effect transistor. Two pieces of plastic aluminum flake with same thickness are pasted on the glass as gate and drain electrodes. A small and parallel gap between two pieces of aluminum pin is left. Teflon films are wiped on the glass of source, gate and drain electrodes as hydrophobic layers. Epoxide resin is used as cofferdam material so a new liquid field-effect transistor (LiquiFET) is produced based on electrowetting on dielectric (EWOD) effect. The displacement of colored oil drop is adjusted by changing the voltages of drain electrodes. And the current changes of source and gate electrodes are controlled. A liquid field-effect transistor is fabricated and its preliminary test results are given.

Key words: electrowetting; transistor; hydrophobic layer; epoxide resin

目前,基于半导体场效应管^[1]的特性,场效应管可用作放大器、电子开关、可变电阻等,因此被广泛应用。然而,探索新的技术已经成为当前研究开发的一个重点。近年来,基于介质上电润湿(EWOD)的液滴驱动与控制技术引起了人们的广泛关注,它被应用到越来越多的研究领域。基于EWOD原理在显示技术的成功应用^[2-8],笔者提出了一种基于EWOD的新型液态场效应管(LiquiFET)^[9],它与MOSFET有着很多相似之处,另外它还具有漏电流较小、没有漏电流饱和和特点。文中完成了液态场效应管的制作,

并对场效应管进行了初步的测试与分析。

1 原 理

1.1 介质上电润湿

介质上电润湿现象是指在毫米尺度下,表面张力占主导力时,在液滴和它所在的固体之间加上电压,可以改变液滴与固体之间润湿性,表现为液滴接触角的变化,如图1a所示。不加电压时,固液、固气和液气界面张力相互平衡,可用Young方程描述

收稿日期:2012-12-23

基金项目:江苏省科技厅-基于离子液体介质电润湿效应的光学调制的研制(SJ211019)

作者简介:王跃庆(1989-),男,江苏淮安人,硕士,主要研究方向为微流控光电子,光通信传输等。

$$\lambda_{s,l} + \lambda_{l,g} \cos \theta = \lambda_{s,g} \quad (1)$$

式中, θ 是液滴与固体的接触角; λ 表示界面的表面张力; 下标 s, l, g 分别表示固相、液相和气相。在液滴与固体之间加上电压后, 在液滴和固体表面之间会感应出电荷, 根据 Lippman 方程, 固液界面的表面张力系数会减小

$$\lambda_{s,l}(V) = \lambda_{s,l}(0) - \frac{\epsilon_0 \epsilon_d}{2d} V^2 \quad (2)$$

式中, ϵ_0 表示真空的介电常数; ϵ_d 表示固体介质的相对介电系数; d 表示介质层有效厚度。这就导致表面张力平衡被打破, 液滴会往下扩展, 在这个过程中, 由于液-气和气-固界面表面张力不变, 所以达到新的平衡时, 接触角 θ 会减小。

对于与水不互溶的油滴在水中的形状随电压的变化, 原理类似, 如图 1b 所示。

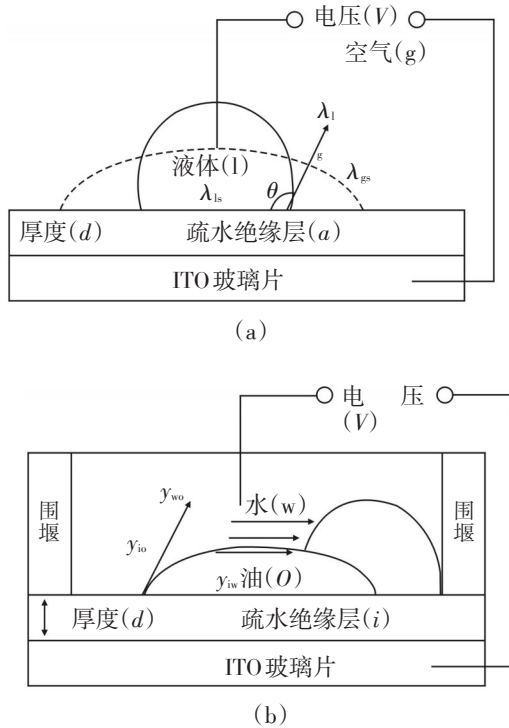


图1 三态电润湿示意图

在初始未加电势的状态下, 一个带有颜色的油滴将自动平铺在水与疏水表面之间, 这是因为在微米尺度下, 表面张力满足

$$\gamma_{i,o} + \gamma_{w,o} < \gamma_{i,w} \quad (3)$$

式中, γ 为表面张力; 下标 w, o 和 i 分别代表水、油以及疏水表面。达到平衡时, Young 方程可写为

$$\gamma_{i,o} + \gamma_{w,o} \cos \theta = \gamma_{i,w} \quad (4)$$

在下电极和水之间加上电压, 原来的平衡被打

破, 外加电势将引起水界面和疏水介质之间表面张力变小, 其改变量 $\gamma_{e,w}$ 由 Lippmann 公式表示为

$$\gamma_{\nabla} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_d}{2d} V^2 \quad (5)$$

式中, V 为外加电势; d 表示介质层有效厚度。因此, 随着外加电势的增大, 当满足

$$\gamma_{i,o} + \gamma_{w,o} > \gamma_{i,w} - \gamma_{\nabla} \quad (6)$$

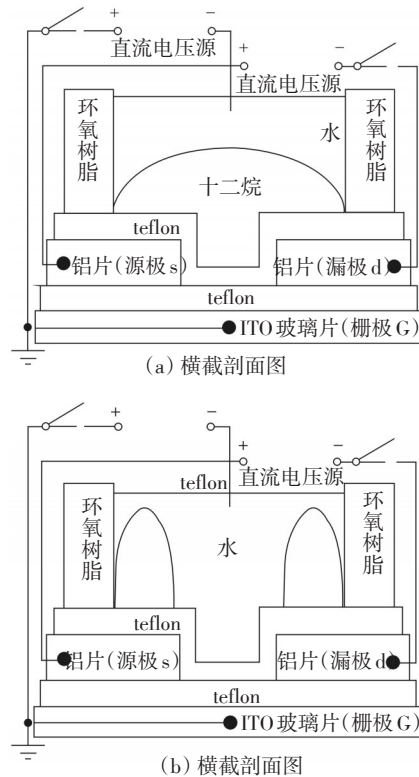
时。油滴不能完全铺满整个显示单元, 水将排开部分油滴, 与疏水性介质材料直接接触, 从而形成如图 1b 所示的水、油以及疏水区三相界面。由 Lippmann 方程和 Young 方程推导出

$$\cos \theta(V) = \frac{\gamma_{i,w} - \gamma_{i,o}(V)}{\gamma_{w,o}} = \frac{\gamma_{i,w} - (\gamma_{i,o} - \frac{\epsilon_0 \epsilon_d}{2d} V^2)}{\gamma_{w,o}} = \cos \theta(0) + \frac{\epsilon_0 \epsilon_d}{2\gamma_{w,o}} V^2 \quad (7)$$

因此, 随着电势逐渐增大, 油滴与疏水介质层接触面积变小, 油滴将收缩。由于在实验条件下油滴的两侧不可能保持绝对的平衡, 油滴四周所受的压力不均, 将使油滴往一侧运动, 如图 1b 所示。

1.2 液态场效应管的结构与工作原理

液态场效应管的结构如图 2 所示, 图 2a、2b 为场效应管的横截剖面图, 图 2c、2d 为场效应管的俯视剖面图。



(a) 横截剖面图

(b) 横截剖面图

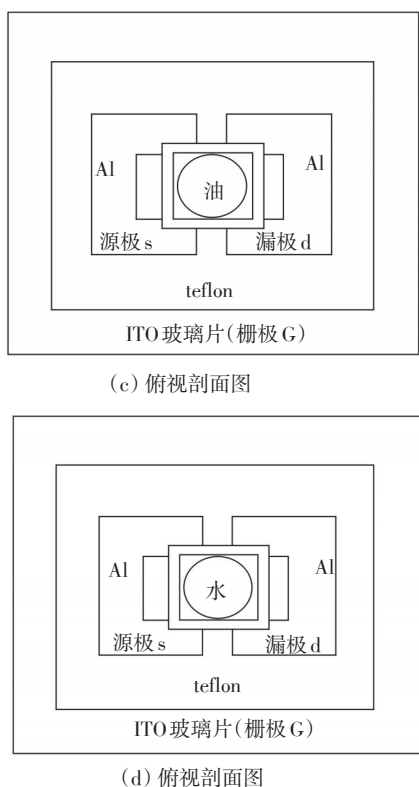


图2 液态场效应管结构与原理图

如图2a和图2c所示,不加电压时,由于在微米尺度下表面能张力满足式(3),油滴将平铺在涂有Teflon的栅极ITO玻璃上,此时源极和漏极之间的沟道被油滴占据,由于油滴绝缘,因此源极和漏极之间没有自由电荷,即不会有电流。当在栅极加上电压之后,如图2b和2d所示,由于电润湿效应,油滴与疏水介质层的接触面积变小,油滴将慢慢鼓起。这是由于电场的作用使得Teflon的表面能增大从而降低了它的疏水性,极性水分子将向栅极板上的疏水层靠近,因此随着 V_g 的逐渐增大,水将逐渐代替油滴占据源极和漏极之间的沟道中,由于非理想情况下,油滴周围的压力不均,导致油滴将被挤到沟道的一侧,沟道间的油滴逐渐被极性水分子代替,那么此时在源极和漏极之间加上电压,则会有电流产生。当栅极电压撤去之后,由于表面张力的作用,油滴将再次平铺于水与疏水表面之间。如此一来,通过改变栅极电压就可以间接改变源极和漏极之间的电流,从而达到场效应管的“开”、“关”状态。

2 液态场效应管的制作和测试

2.1 液态场效应管(LiquiFET)的制作

整个工艺流程与实验操作如下所述。

首先,以商用氧化铟锡(ITO)玻璃片为基底玻璃,用酒精清洗3 min,然后用去离子水冲洗,最后用干燥氮气吹干。之后,如图3a所示用Kapton Tape胶带围成一个2 cm×2 cm的单元,用台式匀胶机在该单元内匀上一层聚四氟乙烯(Teflon AF1600),将其放入烤箱中110 ℃烤10 min,165 ℃烤8 min,330 ℃烤15 min,干燥冷却之后拿出。

其次,如图3b所示,在teflon单元的中间贴上一层宽度为0.5 mm的Kapton Tape胶带,用道康宁硅酮胶水将两块干净干燥的薄铝片平行地贴在胶带的两侧,置于空气中数小时,等待胶水完全固化后,小心地撕去Kapton Tape胶带。

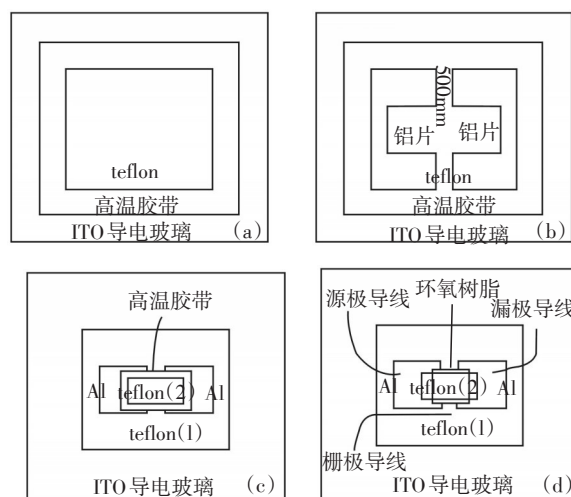


图3 LiquiFET的制作流程图

接着,用Kapton Tape胶带围成如图3c所示的单元,再用台式匀胶机在该单元内匀上一层聚四氟乙烯(Teflon AF1600),之后将其放入烤箱中110 ℃烤10 min,165 ℃烤8 min,330 ℃烤15 min,干燥冷却之后拿出。要求teflon的厚度尽量接近铝片的高度,但不能超过,如果厚度不够,则再次涂覆teflon。成功后,小心地撕去Kapton Tape胶带。

最后,将E51环氧树脂和固化剂按3:1均匀混合,用小竹签将环氧树脂按图3d所示小心地涂覆,围成一个底面积约为3 mm×3 mm,高度约为3 mm的储水单元,置于空气中数小时,待其完全固化。之后,按图3d所示,用导电银胶将导线分别粘贴在ITO玻璃、源极铝片、漏极铝片上。这样简单的液态场效应管就搭建完成。

将水溶性染料红溶解到十二烷($C_{12}H_{26}$)中,并用滤纸去除未溶解的大颗粒染料,这样就制备了有色油滴。先在储水单元内用注射剂注入一定量的去

离子水,再用微量进样器将有色油滴注入水中,其中油滴的厚度要尽量薄一些,当然也要保证油滴的颜色清晰可见。用探针代替上极板探入水中,分别连接探针和栅极导线至直接电压源1,连接源极导线和栅极导线至直接电压源2,将整个装置置于显微镜下,调整好镜头并用测量软件连接至电脑中显示。

2.2 液态场效应管(LiquiFET)的测量

调节直流电压源,在显微镜下观察有色油滴的位

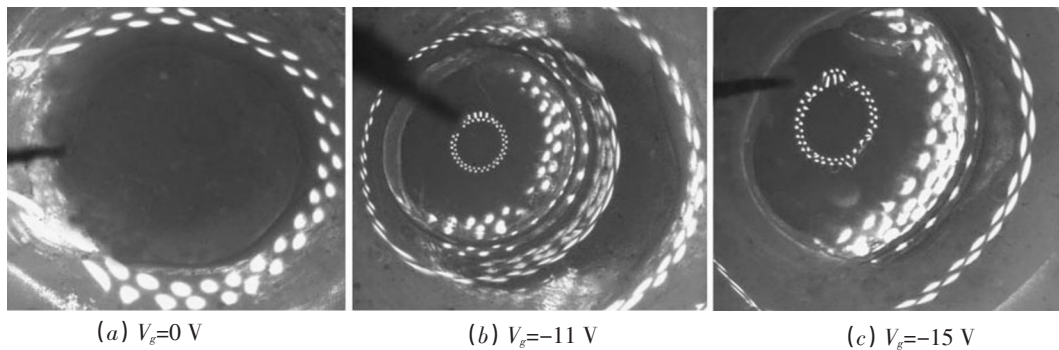


图4 LiquiFET中油滴位移变化示意图

采用高精度电流表分别测量 V_g 为 0V、-11V 与 -15 V 时的源漏极之间的伏安特性。不同 V_G 下的 V_{DS} 与 I_{DS} 的测量值如图 5 所示,源漏极开启电压为 3.5~3.8 V。当栅极电压为零时,随着源漏极电压增大,漏电流几乎为零;当栅极电压为 -11 V 或 -15 V 时,并且源漏极电压大于 4.5 V 时,漏电流 I_{DS} 约为 10^{-7} A,此时 I_{DS} 与 V_{DS} 基本遵循二极管伏安特性曲线;当电压再增加到 5 V 左右时,出现气泡,疏水介质层被击穿。

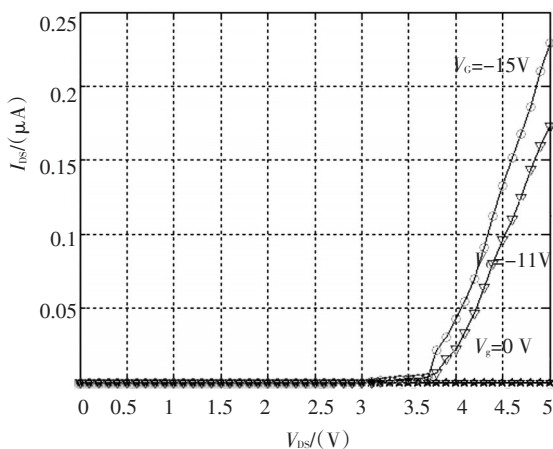


图5 不同 V_G 下的 V_{DS} 与 I_{DS} 的测量值

移。如图4所示,液态场效应管沟道中油滴位移随着栅极电压的不同而改变。当 $V_g = 0$ 时,油滴自动平铺在水与疏水表面之间,油滴位移如图4a所示,油滴铺满了沟道中,此时场效应管表现为“关”的状态。当栅极电压逐渐增大时,沟道中的部分油滴逐渐被极性水分子代替,如图4b,4c所示, V_g 分别为 -11 V 与 -15 V 时油滴的位移,此时场效应管表现为“开”的状态。此时撤掉 V_g ,由于微观条件下表面能的作用,油滴将再次平铺于水与疏水表面之间,如图4a所示。

3 结束语

首先介绍了固水气以及油水固的三态电润湿的原理以及区别。着重介绍了基于油水在疏水介质层的电润湿效应,利用ITO玻璃为栅极,薄铝片为源漏极,Teflon为亲油疏水层,环氧树脂为围堰制成的一种新型的场效应管结构。该电润湿装置不仅可以通过改变栅极电压有效控制着油滴的收缩与扩张,成功地实现了场效应管的“开”和“关”,而且通过测量得知,在 $V_g = -11$ V 与 $V_g = -15$ V 下, I_{DS} 与 V_{DS} 基本遵循二极管伏安特性曲线,论证了其用作场效应管的可行性。LiquiFET与MOSFET有着很多相似之处,但也有一些独特的地方,如漏电流较小、没有漏电流饱和。其缺点是电压过大会导致疏水介质层的击穿,以及装置不能旋转或者移动,导致了LiquiFET离实际应用还差一些,但是随着电润湿效应的不断研究,以及对离子液体电润湿^[10]的深入了解,笔者相信会有更高级更稳定的基于EWOD原理的微流体电子设备出现。

参考文献

- [1] 王淑娟,蔡惟铮,齐明.模拟电子技术基础[M].北京:高等

(下转第37页)

- 的寻峰算法[J]. 中国激光, 2008, 35(6):893-897.
- [13] 朱梅, 张森, 胡立章, 等. 光纤布拉格光栅中心波长检测中的寻峰算法[J]. 光通信研究, 2011, 167(5):60-63.
- [14] Huang Cen, Jing Wencai, Liu Kun. Demodulation of fiber Bragg grating sensor using cross-correlation algorithm [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2007, 19 (9-12): 707-709.
- [15] 郑君里, 应启行, 杨为理. 信号与系统(上册)[M]. 北京: 高等教育出版社, 2007:341-349.

(上接第17页)

(2) 具备主动光电干扰能力

目前无人机光电系统主要任务是光电侦察, 任务单一。其主要光电载荷为光电/红外传感器、激光测距仪等。随着无人机平台技术发展, 载荷能力增强, 针对作战需要, 搭载激光干扰载荷、光电制导导弹的无人机将是未来发展的必然趋势。

在舰艇防护方面, 利用无人机平台优势, 通过搭载光电系统载荷构建空中机动式防护系统。一方面, 利用无人机平台能够垂直起降、空中悬停优势, 弥补舰载平台空间受限的约束; 另一方面, 利用无人机平台相对有人直升机平台结构简单、可靠性高及性价比高的优势, 通过编队伴飞的方式, 增加舰艇的防护半径, 以提高舰艇生存能力。

作战过程中, 无人机光电防护系统在基地平台侦察设备及光电跟踪设备配合下对目标实施定位与跟踪, 接收控制指令编队飞离被保护目标一定距离拦截反舰光电制导导弹, 利用小型激光压制干扰载荷和小型高效中波红外干扰载荷, 压制、阻塞干扰红外/激光制导导弹导引头, 使其失去制导能力。

(3) 具备多用途、高智能将是未来发展目标

目前无人机光电系统的主要缺点和不足是, 缺

少应对突发性事件的能力, 只能执行预定的任务, 功能单一, 且智能化程度较低。随着光电载荷技术、信息技术、控制技术的进步, 发展多用途、高智能的无人机光电载荷系统是一个重要的发展趋势。

参考文献

- [1] 欧阳龙春. 军用无人直升机的发展现状及趋势[J]. 航空科学技术, 2011, Overview: 9-11
- [2] 王岩, 祝小平. 侦察/打击一体化无人机对地攻击控制系统设计[J]. 科学技术与工程, 2011, 11(23): 2728-2733
- [3] 刘波, 张洪涛, 等. 无人直升机技术的发展[J]. 舰船电子工程, 2011, 31(3): 18-21
- [4] 吴源维. 复杂电磁环境下无人机的战场应用[J]. 飞航导弹, 2011(1): 30-35
- [5] 孙成陆. 特种作战中无人机侦察力量的运用[J]. 四川兵工学报, 2011, 32(1): 40-45
- [6] 王方玉. 美国无人机的光电载荷与发展分析[J]. 激光与红外, 2008, 38(4): 311-314
- [7] 刘洵. 军用飞机光电平台的研发趋势与技术剖析[J]. 中国光学与应用光学, 2009, 2(4): 269-288
- [8] 周权. 四旋翼微型飞行平台姿态稳定控制试验研究[J]. 传感器与微系统, 2009, 28(5): 72-79

(上接第28页)

- 教育出版社, 2006: 111-120.
- [2] 林燕强, 王宁, 徐立国. 单电压控制的电润湿显示阵列的制备与研究[J]. Advanced Display, 2012, 5(132): 24-27.
- [3] 徐庆宇, 沈凯, 肖长诗. 电润湿显示单元研究[J]. 光电子技术, 2010, 30(4): 225-229.
- [4] 岳瑞峰, 刘理天, 吴建刚. 基于介质上电润湿的透射式显示器件[J]. 纳米技术与精密工程, 2008, 6(1): 34-37.
- [5] 胡欢, 吴建刚, 赵晶曦. 一种新型基于电润湿的受光反射型显示单元[J]. 微纳电子技术, 2006(4): 190-193.
- [6] H.You, A.J.Steckl. Three-color electrowetting display device for electronic paper[J]. Applied physics letters, 2010, 97(023514): 1-3.
- [7] Beni G, TenanM A. Dynamics of electrowetting display[J]. Applied physics letters, 1981, 52(10): 8011-8015.
- [8] Hayes R A, Feenstra B J. Video-speed electronic paper based on electrowetting [J]. Nature, 2003, 425(6956): 383-385.
- [9] D.Y.Kim, A.J.Steckl. Liquid-state field-effect transistors using electrowetting[J]. Applied physics letters, 2007, 90(043507): 1-3.
- [10] Hu-Xiaodong. Electrowetting based infrared lens using ionic liquids[J]. Applied Physics Letters, 2011, 99(213505): 1-3.