

基于 KH550-GO 固态电解质中电容耦合作用的双侧栅 IZO 薄膜晶体管

郭立强 温娟 程广贵 袁宁一 丁建宁

Dual in-plane-gate coupled IZO thin film transistor based on capacitive coupling effect in KH550-GO solid electrolyte

Guo Li-Qiang Wen Juan Cheng Guang-Gui Yuan Ning-Yi Ding Jian-Ning

引用信息 Citation: [Acta Physica Sinica](#), 65, 178501 (2016) DOI: 10.7498/aps.65.178501

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.178501>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2016/V65/I17>

---

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

高功率微波作用下高电子迁移率晶体管的损伤机理

High power microwave damage mechanism on high electron mobility transistor

物理学报.2016, 65(16): 168501 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.168501>

镉锌氧化物薄膜晶体管局域态分布的提取方法

Extraction of density of localized states in indium zinc oxide thin film transistor

物理学报.2016, 65(12): 128501 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.128501>

退火温度和 Ga 含量对溶液法制备 InGaZnO 薄膜晶体管性能的影响

Effects of annealing temperature and Ga content on properties of solution-processed InGaZnO thin film

物理学报.2016, 65(12): 128502 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.128502>

AlGaIn/GaN 双异质结 F 注入增强型高电子迁移率晶体管

Enhancement mode AlGaIn/GaN double heterostructure high electron mobility transistor with F plasma treatment

物理学报.2016, 65(3): 038501 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.038501>

内嵌 CuO 薄膜对并五苯薄膜晶体管性能的改善

Analysis of improved characteristics of pentacene thin-film transistor with an embedded copper oxide layer

物理学报.2015, 64(22): 228502 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.228502>

# 基于KH550-GO固态电解质中电容耦合作用的 双侧栅IZO薄膜晶体管\*

郭立强<sup>1)2)</sup> 温娟<sup>1)†</sup> 程广贵<sup>1)</sup> 袁宁一<sup>1)2)</sup> 丁建宁<sup>1)2)</sup>

1)(江苏大学微纳米科学技术研究中心, 镇江 212013)

2)(常州大学, 江苏省光伏科学与工程协同创新中心, 常州 213164)

(2016年4月25日收到; 2016年6月16日收到修改稿)

本文利用旋涂技术在氧化铟锡塑料衬底上, 制备了硅烷偶联剂( $\gamma$ -氨丙基三乙氧基硅烷)-氧化石墨烯固态电解质; 以此固态电解质作为栅介质, 进一步研究了双侧栅耦合电场质子/电子杂化氧化铟锌薄膜晶体管的电学特性. 研究发现 $\gamma$ -氨丙基三乙氧基硅烷-氧化石墨烯固态电解质的双电层电容和质子电导率分别高达 $2.03 \mu\text{F}/\text{cm}^2$ 和 $6.99 \times 10^{-3} \text{ S}/\text{cm}$ ; 由于 $\gamma$ -氨丙基三乙氧基硅烷-氧化石墨烯复合固态电解质具有较大的双电层电容和质子电导率, 利用其作为栅介质的质子/电子杂化氧化铟锌薄膜晶体管功耗低(其工作电压仅为约2 V), 其开关比和场效应迁移率分别为 $1.23 \times 10^7$ 和 $24.72 \text{ cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$ . 由于 $\gamma$ -氨丙基三乙氧基硅烷-氧化石墨烯固态电解质的电容耦合作用, 氧化铟锌薄膜晶体管在双侧栅电压刺激下, 可有效地调控器件的阈值电压、亚阈值摆幅和场效应迁移率, 并可实现“与”门逻辑运算功能.

**关键词:** KH550-GO 复合固态电解质, 双电层效应, 质子导体膜, 电容耦合

**PACS:** 85.30.Tv, 77.55.D-, 73.61.-r

**DOI:** 10.7498/aps.65.178501

## 1 引言

低压双电层氧化物薄膜晶体管在多态存储器、探测器、电化学传感器、生物神经突触仿真等微器件领域具有极大的应用前景和科学研究价值<sup>[1-5]</sup>. 此外, 低压双电层氧化物薄膜晶体管因具有高的迁移率、高的可见光透射率和可低温制备等特点, 受到研究人员的极大关注<sup>[6,7]</sup>. 目前对于低压双电层氧化物薄膜晶体管的研究大致分为两个方面: 一方面, 集中于ZnO作为沟道层、源漏电极的材料, 之后逐渐发展到In, Sn和Ga等元素的氧化物以及含有这些元素的复合氧化物, 并取得了巨大的进展. 文献<sup>[8-10]</sup>在室温条件下制备了氧化铟锌(IZO)薄膜晶体管, 比较研究了快速退火前后IZO薄膜的结晶情况和沟道层厚度对IZO薄膜晶体管电学特

性的影响, 结果表明随有源层厚度在33—114 nm范围内增加, IZO薄膜晶体管电学性能逐渐变好, 尤其场效应迁移率达到约 $4.59 \text{ cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$ , 大大优于传统非晶硅薄膜晶体管性能. Lee等<sup>[11]</sup>研究发现源漏电极与沟道层之间存在一定的接触电阻, 这个接触电阻的大小受到所加栅电压的调制作用. 另一方面, 集中于栅介质材料的开发研究<sup>[12]</sup>. 研究发现采用有机/无机质子导体薄膜作为低压双电层氧化物薄膜晶体管的栅介质时, 在栅极施加正偏压的情况下, 栅介质中的质子将向远离栅极的方向输运, 最终在靠近沟道层的栅介质表面形成质子积累层. 同时在薄膜晶体管沟道层下表面被诱导出一层电子, 从而达到双电层静电调控的目的, 实现薄膜晶体管在低压( $<1.5 \text{ V}$ )条件下的驱动<sup>[13]</sup>. 质子导体薄膜的质子电导特性高达 $10^3 \text{ S}/\text{cm}$ , 其栅诱导

\* 国家自然科学基金(批准号: 51402321)、江苏省光伏科学与技术国家重点实验室培育建设点开放课题基金(批准号: SKLP-STKF201503)、江苏省博士后科研资助计划(批准号: 1402071B)和江苏大学高层次人才基金(批准号: 14JDG049)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: wenjuan930924@sina.com

空穴密度为  $2 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ , 电容约为  $10 \text{ } \mu\text{F}/\text{cm}^2$ , 例如聚乙烯氧化物<sup>[14]</sup>. Herlogsson等<sup>[15]</sup>利用磷酸和聚丙烯酸共聚物有机质子导体作为栅介质, 利用P3HT作为沟道层, 制备的固体电解质栅介质双电静电调控层薄膜晶体管的开关响应时间小于  $0.3 \text{ ms}$ 、驱动电压小于  $1 \text{ V}$ , 而利用浓度为1%的  $\text{LiClO}_4$  溶液浸泡后, 由于栅电极和沟道层之间产生了电容耦合, 输出饱和电流展现出明显的电流调制效应. 交联聚氰乙基介电常数为12.6, 且具有较好的绝缘特性, 利用厚度为  $120 \text{ nm}$  的交联聚氰乙基作为栅介质层, 其电容在  $20 \text{ Hz}$  时高达  $92.9 \text{ nF}/\text{cm}^2$ , 场效应迁移率为  $0.62 \text{ cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$ , 亚阈值斜率为  $185 \text{ mV}/\text{dec}$ .<sup>[16]</sup> 综上所述, 对于低压双电层氧化物薄膜晶体管的研究, 虽已取得了较大进展, 但距离其广泛应用还需要进一步探索研究, 而研发新材料结构体系低压双电层氧化物薄膜晶体管是这一目标实现的途径之一.

本文制备了  $\gamma$ -氨丙基三乙氧基硅烷-氧化石墨烯(KH550-GO)复合固态电解质, 并研究了以KH550-GO为栅介质的双侧栅耦合电场质子/电子杂化氧化铟锌薄膜晶体管的电学特性. 利用Solartron 1260 A阻抗分析仪测试了KH550-GO固态电解质的电容-频率特性曲线和阻抗特性曲线, 采用Keithley 4200 SCS 半导体参数仪研究了质子/电子杂化氧化铟锌薄膜晶体管的电学特性. 结果表明该器件的工作电压仅为  $2 \text{ V}$ , 开关比高达  $1.23 \times 10^7$ , 场效应迁移率达到  $24.72 \text{ cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$ . 本文进一步分析了基于电容耦合作用的双侧栅质子/电子杂化氧化铟锌薄膜晶体管的电学特性变化趋势, 并最终成功实现了器件的“与”门逻辑运算功能.

## 2 实 验

首先, 采用改进的Hummers方法制备出片状结构氧化石墨烯, 以二甲基甲酰胺(DMF)作为分散剂, 配制浓度约为  $2 \text{ mg}/\text{mL}$  的氧化石墨烯分散液; 为提高氧化石墨烯分散液的分散特性, 配置过程中采用超声波振动  $30 \text{ min}$ . 其次, 将氧化石墨烯分散液加入KH550溶液中, 比例为  $1 : 20$ , 进行接枝反应, 反应时采用磁力搅拌机搅拌  $24 \text{ h}$ , 温度为  $70 \text{ }^\circ\text{C}$ , 最终得到KH550-GO复合溶液. 然后, 按体积比  $1 : 1 : 1$  取KH550-GO复合溶液、去离子水

和酒精混合, 使KH550-GO水解, 其中水解温度为  $35 \text{ }^\circ\text{C}$ , 时间为  $2 \text{ h}$ . 最后将水解后的复合溶液旋涂到氧化铟锡(ITO)塑料衬底上, 并在烘干台上烘干  $2 \text{ h}$ , 温度为  $70 \text{ }^\circ\text{C}$ , 从而得到KH550-GO固态电解质. 采用自组装技术, 在室温和  $0.5 \text{ Pa}$  的 Ar 气环境中射频磁控溅射沉积一层约  $150 \text{ nm}$  厚 IZO 源、漏、栅电极. 由于溅射过程的衍射现象, 部分 IZO 颗粒会进入并沉积在镍掩模板覆盖的区域, 因此 IZO 源、漏电极形成的同时, 源漏电极之间形成厚度约为  $30 \text{ nm}$  的 IZO 沟道层, 其中沟道的长度和宽度分别为  $80$  和  $1000 \text{ } \mu\text{m}$ . 沉积过程中, 采用 IZO 靶材(质量分数为 90% 的  $\text{In}_2\text{O}_3$  和 10% 的  $\text{ZnO}$ ), 射频电源的功率为  $100 \text{ W}$ , Ar 流量为  $14 \text{ sccm}$  ( $1 \text{ sccm} = 1 \text{ mL}/\text{min}$ ), 溅射时间为  $15 \text{ min}$ . 为了测试KH550-GO固态电解质的表面形貌, 将部分溶液旋涂到  $n^{++}(100) \text{ Si}$  衬底上, 采用场发射扫描电镜进行测试(HitachiS-4800 SEM). 利用Solartron 1260 A 阻抗分析仪表征KH550-GO固态电解质的电容-频率特性曲线和阻抗特性曲线; 在室温黑暗环境条件下, 采用Keithley 4200 SCS 半导体参数仪分析质子/电子杂化氧化铟锌薄膜晶体管的电学特性.

## 3 结果与分析

图 1(a) 为  $n^{++}(100) \text{ Si}$  衬底上制备的KH550-GO固态电解质的扫描电镜(SEM)表面形貌. 由图 1可见, KH550-GO固态电解质表面呈现出不规则的微介孔状, 表明KH550-GO固态电解质结构疏松, 且具有微介孔通道. 此微介孔通道为吸收、储存空气中的水分子以及H质子迁移提供了场所和途径. 在ITO/KH550-GO固态电解质/IZO的三明治结构中(如图 1(c)插图所示), 在ITO电极施加正向电压时, H质子可通过孔隙向KH550-GO固态电解质/IZO界面迁移, 在IZO内部的下界面产生等量的电子层<sup>[17]</sup>, 质子层和电子层共同组成双电层<sup>[18]</sup>. 根据相位角理论, KH550-GO固态电解质的电容-频率曲线可成两部分, 如图 1(b)所示. 1) 在高频 ( $f > 3.3 \text{ kHz}$ ,  $\theta(f) > 45^\circ$ ) 区域, KH550-GO固态电解质表现出良好的电阻特性. 这是因为在高频激励下, 质子响应时间不足, 无法迁移到KH550-GO固态电解质/IZO界面, 该部分也称为离子弛豫区. 2) 在低频 ( $f < 3.3 \text{ kHz}$ ,  $\theta(f) < 45^\circ$ ) 区域, KH550-

GO 固态电解质表现出极好的电容特性. 这表明随频率逐渐降低, 质子响应时间延长, 向 KH550-GO 固态电解质/IZO 界面迁移和积累. 由于大量质子

的积累, 最终在 KH550-GO 固态电解质/IZO 界面形成双电层<sup>[19]</sup>. 当频率降低到 1 Hz 时, KH550-GO 固态电解质的电容达到  $2.03 \mu\text{F}/\text{cm}^2$ .

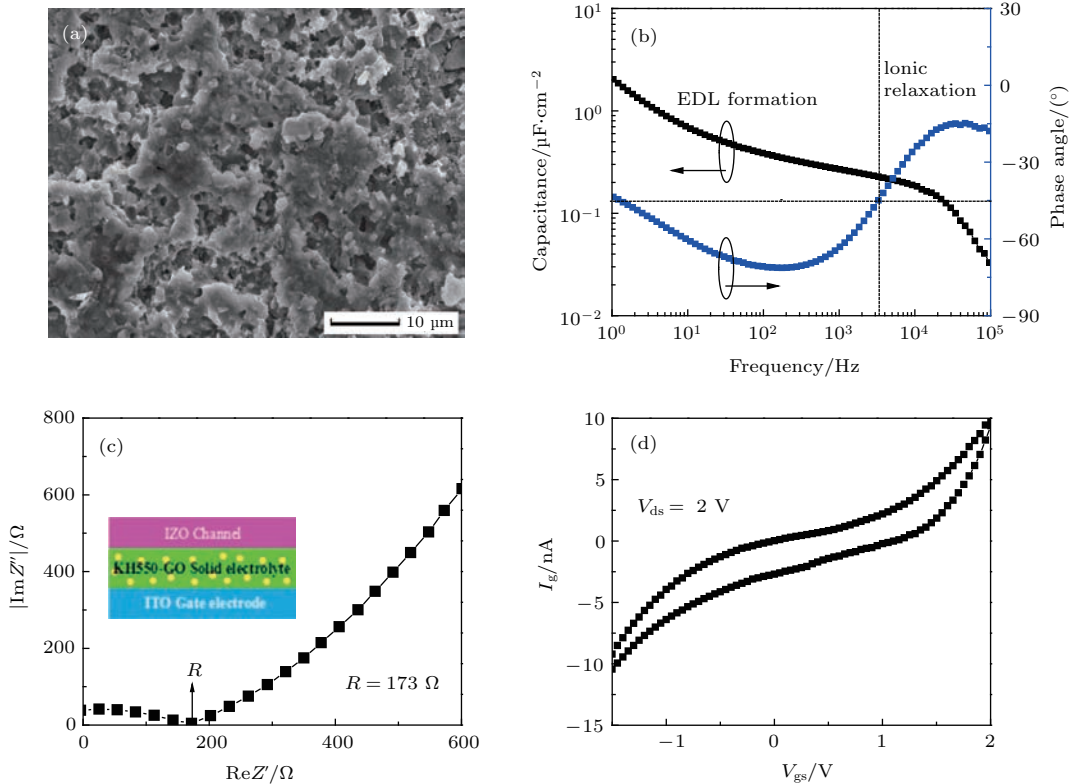


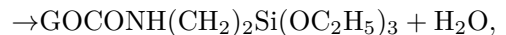
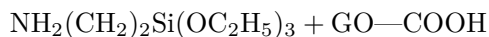
图1 (网刊彩色)(a)  $n^{++}$  型硅 (100) 衬底上 KH550-GO 固态电解质的 SEM 表面形貌; (b) KH550-GO 固态电解质的电容-频率特性曲线; (c) KH550-GO 固态电解质的 Cole-Cole 特性曲线, 插图为 ITO/KH550-GO 固态电解质/IZO 的三明治结构示意图; (d) ITO/KH550-GO 固体电解质/IZO 结构的漏电流特性曲线

Fig. 1. (color online) (a) A SEM image of KH550-GO solid electrolyte on  $n^{++}$  (100) Si substrate; (b) frequency-dependent specific capacitance of KH550-GO solid electrolyte; (c) Cole-Cole plot of KH550-GO solid electrolyte, Inset: The ITO/KH550-GO solid electrolyte /IZO structure diagram; (d) the leakage current curve of ITO/KH550-GO solid electrolyte/IZO structure.

为研究质子的迁移特性, 本文测试了 KH550-GO 固态电解质的阻抗 Cole-Cole 特性曲线, 如图 1(c) 所示. 根据电化学阻抗谱理论, 纵横坐标分别为复数阻抗的实部和虚部, 当虚部为 0 时可得到实部值  $R$  为  $173 \Omega$ , 通过下式即可计算出质子电导率  $\sigma$ :

$$\sigma = \frac{D}{(R - R_0)A}, \quad (1)$$

式中  $D$  是质子导体层的厚度约为  $15 \mu\text{m}$ ,  $A$  是电极表面面积约为  $1.5 \times 10^{-3} \text{cm}^2$ ,  $R_0$  是电极电阻约为  $30 \Omega$ , 因此可计算得出质子电导率为  $6.99 \times 10^{-3} \text{S}/\text{cm}$ . 高质子电导率可归因于在 KH550-GO 固体电解质中生成了缩合反应<sup>[20]</sup>:



反应后 KH550-GO 固体电解质中的  $-\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_3$  基团很容易水解成  $\text{Si}-\text{OH}$ , 而电场的作用可以促进该水解过程, 从而促进 H 质子的产生, 提高了质子导电特性<sup>[21,22]</sup>. 图 1(d) 为 ITO/KH550-GO 固体电解质/IZO 结构的漏电流曲线, 2 V 偏压下漏电流约为  $9.39 \text{nA}$ , 所得的漏电流比沟道电流小 5 个数量级. 综上所述表明 KH550-GO 固体电解质具有较好的调控特性, 能够保证器件正常工作时不受漏电流的影响.

图 2(a) 是基于 KH550-GO 固体电解质为栅介质的质子/电子杂化氧化铟锌氧化薄膜晶体管结构示意图. 图 2(b) 是基于 KH550-GO 固体电解质

为栅介质的质子/电子杂化氧化铟锌氧化物薄膜晶体管结构的转移特性曲线, 其中  $V_{ds}$  为 1 V, 栅压  $V_{gs}$  由 -3 V 扫描至 3 V 然后回程, 扫描速度为 50 mV/s. 由于双电层效应, 该薄膜晶体管的工作电压低至 2 V. 由图 2(b) 可见, 由于 KH550-GO 固体电解质中质子迁移特性, 转移特性曲线中存在一条逆时针回滞曲线. 当  $V_{gs}$  从 3 V 扫描回至 -3 V 时, 在栅介质层与沟道层界面处的质子没完全回到它们原来的所在位置, 所以即使在同样大小的  $V_{gs}$  下, 回程曲线上源漏电流值  $I_{ds}$  会比之前曲线上的值高, 因此形成了回滞窗口. 器件开关比为  $1.23 \times 10^7$ , 亚阈值斜率可由下式估算:

$$S = \frac{dV_{gs}}{d(\log_{10} I_{ds})}. \quad (2)$$

经过计算亚阈值斜率为 238.7 mV/dec., 器件的阈值电压  $V_{th}$  可以通过  $I_{ds}^{1/2}-V_{gs}$  曲线的拟合直线在  $x$  轴的截距得到,  $V_{th}$  为 0.49 V, 因而饱和区 ( $V_{ds} > V_{gs} - V_{th}$ ) 场效应迁移率可以根据下式

获得:

$$I_{ds} = \frac{\mu C_i W}{2L} (V_{gs} - V_{th})^2, \quad (3)$$

式中  $L$  为沟道长度,  $L = 80 \mu\text{m}$ ,  $W$  为沟道宽度,  $W = 1000 \mu\text{m}$ ,  $C_i$  为 KH550-GO 固体电解质单位面积电容,  $C_i = 2.03 \mu\text{F}/\text{cm}^2$ . 通过计算可得, 饱和区场效应迁移率  $\mu$  约为  $24.72 \text{ cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$ .

图 2(c) 为质子/电子杂化氧化铟锌氧化物薄膜晶体管的输出特性曲线. 如图 2(c) 所示, 源漏电压  $V_{ds}$  从 0 V 扫到 2 V, 同时栅极电压  $V_{gs}$  以每次增加 0.2 V 的幅度从 0.2 V 增至 1.8 V. 从图 2(c) 可以看出, 在源漏电压  $V_{ds}$  较低时, 器件具有明显的线性区, 表明器件具有良好的欧姆接触; 而当源漏电压  $V_{ds}$  较高时, 器件又表现出良好的饱和特性; 当  $V_{ds}$  为 2 V,  $V_{gs}$  为 1.8 V 时, 器件饱和电流达到  $849 \mu\text{A}$ . 图 2(d) 为该器件的脉冲响应图, 在  $V_{ds}$  加载 1.5 V 电压,  $V_{gs}$  加载 -1.2 和 1.2 V 电压的脉冲测试信号

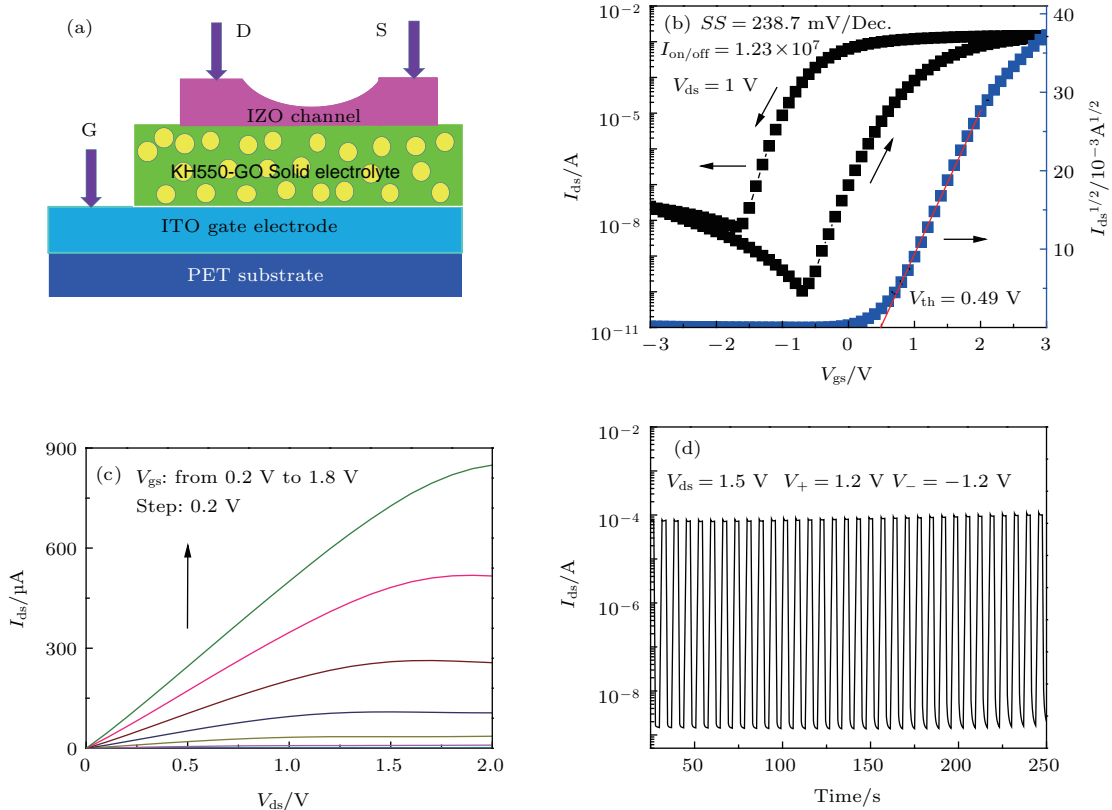


图 2 (网刊彩色) (a) 基于 KH550-GO 固体电解质为栅介质的质子/电子杂化氧化铟锌氧化物薄膜晶体管结构示意图; (b) 器件的转移特性曲线; (c) 器件的输出特性曲线; (d) 器件的脉冲响应特性

Fig. 2. (color online) (a) The Schematic image of proton/electron hybrid IZO film transistors gated by KH550-GO solid electrolyte structure; (b) transfer characteristics of the device at  $V_{ds} = 1 \text{ V}$ , the curves are displayed in logarithmic scales and square root scales; (c) output characteristics of the device with  $V_{gs} = 0.2 \text{ V}$  to 1.8 V in 0.2 V steps from bottom to top; (d) time response of the device to pulse square-shaped gate voltage with amplitudes of  $V_+ = 1.2 \text{ V}$  and  $V_- = -1.2 \text{ V}$  and  $V_{ds} = 1.5 \text{ V}$ .

下,并无明显电流损失,且维持稳定的开关比.这表明IZO沟道层和KH550-GO固体电解质之间没有发生明显的电学掺杂,器件显示出了较好的稳定性.为进一步研究在电场耦合下,KH550-GO固体电解质的耦合作用,本文制备了基于KH550-GO固体电解质为栅介质的双侧栅耦合电场质子/电子杂化氧化铟锌薄膜晶体管,其结构示意图如图3所示.

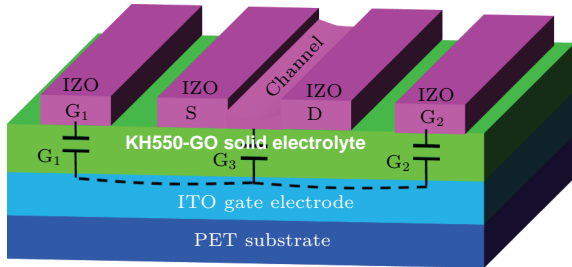


图3 (网刊彩色) 双侧栅耦合电场质子/电子杂化氧化铟锌薄膜晶体管的结构示意图

Fig. 3. (color online) The Schematic image of dual in-plane-gate coupled proton/electron hybrid IZO thin film transistors.

图4(a)给出了不同电场耦合作用的器件转移

特性曲线.由图4(a)可见,当栅电极G2加载偏置电压-2 V时,单侧栅(G1)晶体管一直处与关断状态,源漏电流在3 nA以下.当栅电极G2加载的偏置电压为-1 V时,单侧栅(G1)晶体管在0.35 V时出现开启电压,但最终的开电流只有不到0.9  $\mu$ A,开关比不到 $10^4$ .而当G2加载的偏置电压为0 V时,单侧栅(G1)晶体管的开关比已达 $1.58 \times 10^5$ ,开电流为47  $\mu$ A.随着G2加载的偏置电压进一步增大至2 V时,单侧栅(G1)晶体管的开关比增加到 $8.25 \times 10^5$ ,开关比随G2加载的偏置电压 $V_{gs2}$ 变化曲线如图4(c)所示.从上述说明可以得出,当 $V_{gs2}$ 从负向到正向变化时,单侧栅(G1)晶体管的开启状态从抑制转向开启,说明G2施加不同偏置电压对单侧栅(G1)晶体管有着抑制或开启的功能.由于G1和G2为等效对称的栅电极,G1和G2只要其中一个加载负偏压,则相对应的侧栅晶体管不能开启,只有两者同时为正电压时,沟道才会有较大的电流出现,这为实现双侧栅晶体管的逻辑功能提供了基础.

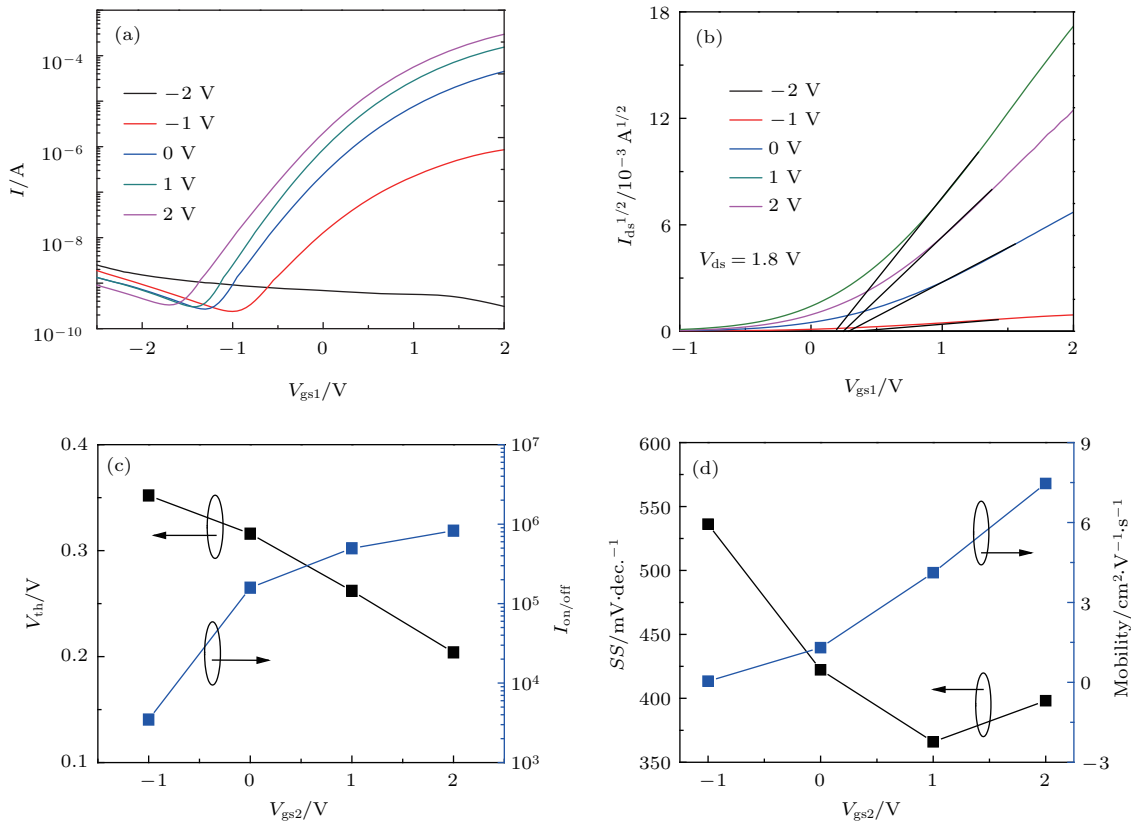


图4 (网刊彩色) (a) 不同电场耦合作用的器件转移特性曲线; (b)  $I_{ds}^{1/2}$  随  $V_{gs1}$  在不同的  $V_{gs2}$  下变化曲线; (c) 器件的阈值电压和开关比随  $V_{gs2}$  的变化; (d) 器件的亚阈值摆幅和场效应迁移率随  $V_{gs2}$  的变化

Fig. 4. (color online) (a) The transfer characteristics of the device under different electric field coupling ( $V_{ds} = 1.8$  V) with different  $V_{gs2}$  ranging from -2 V to 2 V; (b) the  $I_{ds}^{1/2}$  versus  $V_{gs1}$  curves with different  $V_{gs2}$  ranging from -2 V to 2 V; (c)  $V_{th}$  and  $I_{on/off}$  ratio of devices at different  $V_{gs2}$ ; (d) SS and mobility of devices at different  $V_{gs2}$ .

图 4(b) 为不同的  $V_{gs2}$  条件下,  $I_{ds}^{1/2}$  随栅电极 G1 加载的电压  $V_{gs1}$  的变化曲线图, 对曲线进行线性拟合得到的直线与横坐标的交点为阈值电压, 阈值电压随  $V_{gs2}$  的变化曲线如图 4(c) 所示, 图中阈值电压从 0.35 V 降至 0.20 V, 逐渐减小, 表明此时晶体管的工作模式为增强型, 且有逐步向耗尽型进行转变的趋势, 这主要是由于当 G2 加载负向电压时, 为补偿负电压所耗尽的沟道层的电流, 第一个侧栅必须向横坐标的正方向移动, 所以转移曲线会随之向横坐标正向移动, 从而使  $V_{th}$  发生正向偏移; 当 G2 加载正向电压时, 正电压会增强沟道的导电性, 从而增加额外的电流, 导致转移曲线会向横坐标负向移动, 则  $V_{th}$  会向负向偏移. 从图 4(a) 中可分别算出亚阈值摆幅和场效应迁移率, 其随  $V_{gs2}$  的变化曲线如图 4(d) 所示, 图 4(d) 中当  $V_{gs2}$  从 -1 V 依次变到 1 V 时, 亚阈值摆幅不断减小. 这是因为随着  $V_{gs2}$  的增加, 沟道中质子的迁移速度逐渐增加; 但当  $V_{gs2}$  为 2 V 时亚阈值摆幅开始增加, 可能是由于晶体管在  $V_{gs2}$  加到 2 V 时, 已经趋于饱和状态, 沟道中质子的迁移速度逐渐趋于平缓. 当  $V_{gs2}$  从 -1 V 依次增加至 2 V 时, 场效应迁移率呈上升趋势. 这是因为当  $V_{ds}$  不变时, 随着  $V_{gs2}$  的增加, 垂直方向的电场增加, 质子在垂直方向的运动亦加快.

为了研究双侧栅耦合电场质子/电子杂化氧化铟锌薄膜晶体管在逻辑功能方面的应用, 进一步测试了该晶体管的“与”门逻辑输入输出特性. 图 5(a) 为基于 KH550-GO 固体电解质为栅介质的双侧栅耦合电场质子/电子杂化氧化铟锌薄膜晶体管的等效电路, 侧栅 G1 和 G2 分别为两个输入端, 源漏电流  $I_{ds}$  为输出端. 由于源栅之间的距离为 300  $\mu\text{m}$ , 而栅介质的厚度只有 15  $\mu\text{m}$ , 当源栅之间加上电压时, 栅电极 G1 和 G2 垂直方向的双电层电容  $C_1$  和  $C_2$  与 IZO 导电薄膜下的栅介质双电层  $C_3$  通过浮栅 ITO 导电薄膜进行了有效的静电耦合, 因此实际电容是由三个电容  $C_1$ ,  $C_2$  和  $C_3$  串联得到的. 当栅极同时施加两个等价的 G1 和 G2 电压时, 测试结果如图 5(b) 所示. 当两个栅电极 G1 和 G2 同时施加 -3 V 偏压时, 其负栅压会通过双电层静电耦合耗尽 IZO 沟道层里的载流子, 使晶体管处于截止状态, 输出的电流为 0.4 nA 左右; 当两个栅电极 G1 和 G2 其中一个施加 -3 V 偏压, 另一个施加 2 V 偏压时, 由于强大的双电层静电耦合, 一个

侧栅的负栅压就足以耗尽 IZO 沟道层里的载流子, 使晶体管仍处于未导通的状态, 输出的电流还是 0.4 nA 左右; 仅当 G1 和 G2 同时施加 2 V 正偏压时, 两个侧栅的正栅压通过双电层静电耦合, 积累了 IZO 沟道层里的载流子, 晶体管才呈开启状态, 输出的电流可达到 130 A. 假如把输入电压 -3 V 作为输入“0”状态, 输入电压 2 V 作为输入“1”状态, 以及输出电流小于 0.4 nA 作为输出“0”状态, 输出电流大于 21.6  $\mu\text{A}$  作为输出“1”状态, 则根据测试结果可得氧化铟锌薄膜晶体管逻辑功能如表 1 所示.

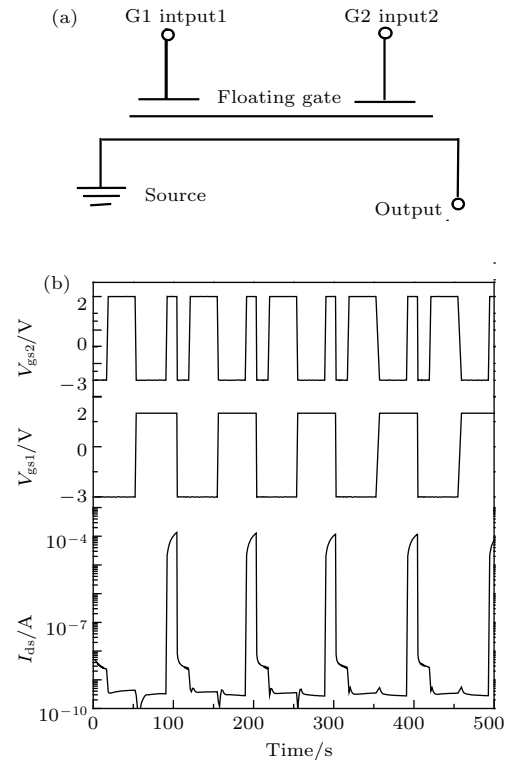


图 5 (a) 双侧栅耦合电场质子/电子杂化氧化铟锌薄膜晶体管的等效电路; (b) “与”门逻辑特性曲线

Fig. 5. (a) The equivalent logic circuit of dual in-plane-gate coupled proton/electron hybrid IZO thin film transistors gated by KH550-GO solid electrolyte; (b) input-output characteristics of the AND logic curve.

表 1 双侧栅耦合电场质子/电子杂化氧化铟锌薄膜晶体管的逻辑功能表

Table 1. The logic function table of dual in-plane-gate coupled proton/electron hybrid IZO thin film transistors.

G1	G2	$I_{ds}$
0	0	0
1	0	0
0	1	0
1	1	1

由表1可见, 该器件具有良好的“与”门逻辑功能. 综上所述, 本文制备的双侧栅耦合电场质子/电子杂化氧化铟锌薄膜晶体管在生物传感器和人工突触领域具有潜在的应用价值.

## 4 结 论

本文通过氧化石墨烯中羧基和硅烷偶联剂中氨基之间的缩氨反应, 制备了KH550-GO固体电解质; 分析了KH550-GO固体电解质的调控特性以及作为栅介质时, 质子/电子杂化氧化铟锌薄膜晶体管的电学特性. 研究发现, KH550-GO固态电解质的双电层电容和质子电导率分别为 $2.03 \mu\text{F}/\text{cm}^2$ 和 $6.99 \times 10^{-3} \text{ S}/\text{cm}$ ; 质子/电子杂化氧化铟锌薄膜晶体管工作电压仅为2 V, 电流开关比高达 $1.23 \times 10^7$ , 场效应迁移率达到 $24.72 \text{ cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$ . 由于KH550-GO固体电解质的电容耦合作用, 双侧栅结构器件的阈值电压、亚阈值摆幅、开关比和场效应迁移率随电容耦合均发生了不同程度变化, 并实现了“与”门逻辑运算功能.

## 参考文献

- [1] Guo L Q, Wan C J, Zhu L Q, Wan Q 2013 *Appl. Phys. Lett.* **103** 113503
- [2] Guo D, Zhou M, Zhang X A, Xu C, Jiang J, Gao F, Wan Q, Li Q H, Wang T H 2013 *Anal. Chim. Acta* **773** 83
- [3] Kim K, Chen L C, Truong Q Y, Shen A M, Chen Y 2013 *Adv. Mater.* **25** 1693
- [4] Gkoupidenis P, Scafer N, Strakosas X, Fairfield J A, G G Malliaras 2015 *Appl. Phys. Lett.* **107** 263302
- [5] Guo L Q, Yang Y Y, Zhu L Q, Wu G D, Zhou J M 2013 *AIP Adv.* **3** 072110
- [6] Fortunato E, Barquinha P, Pimentel A, Goncalves A, Marques A, Martins R, Pereira L 2004 *Appl. Phys. Lett.* **85** 2541
- [7] Zhao K S, Xuan R J, Han X, Zhang G M 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 197201 (in Chinese) [赵孔胜, 轩瑞杰, 韩笑, 张耕铭 2012 物理学报 **61** 197201]
- [8] Chong E, Kim S H, Cho E A, Jang G E, Lee S Y 2011 *Curr. Appl. Phys.* **11** S132
- [9] Chen A H, Tao H, Zhang H Z, Liang L Y, Zhang H Z, iang L Y, Liu M Z, Yu Z, Wan Q 2010 *Microelectron. Eng.* **87** 2019
- [10] Zhang H Z, Cao H T, Chen A H, Liang L Y, Liu M Z, Yu Z, Wan Q 2010 *Solid State Electron.* **54** 479
- [11] Lee S, Park H, Paine D C 2012 *Thin Solid Films* **520** 3769
- [12] Kergoat L, Herlogsson L, Braga D, Piro B, Pham M C, Crispin X, Berggren M, Horowitz G 2010 *Adv. Mater.* **22** 2565
- [13] Zhou B, Sun J, Han X, Jiang J, Wan Q 2011 *IEEE Electron. Dev. Lett.* **32** 1549
- [14] Matthew J P, Frisbie C D 2007 *J. Am. Chem. Soc.* **129** 6599
- [15] Herlogsson L, Crispin X, Robinson N D, Sandberg M, Hagel O J, Gustafsson G, Berggren M 2007 *Adv. Mater.* **19** 97
- [16] Kim S H, Yang S Y, Shin K, Jeon H, Lee J W, Hong K P, Park C E 2006 *Appl. Phys. Lett.* **89** 183516
- [17] Larsson O, Said E, Burggren M, Crispin X 2009 *Adv. Funct. Mater.* **19** 3334
- [18] Zhu D M, Men C L, Cao M, Wu G D 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 117305 (in Chinese) [朱德明, 门传玲, 曹敏, 吴国栋 2013 物理学报 **62** 117305]
- [19] Wee G, Larsson O, Srinivasan M, Berggren M, Crispin X, Mhaisalkar S 2010 *Adv. Funct. Mater.* **20** 4344
- [20] Jiang J, Sun J, Dou W, Zhou B, Wan Q 2011 *Appl. Phys. Lett.* **99** 193502
- [21] Guo L Q, Huang Y K, Shi Y Y, Cheng G G, Ding J N 2015 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **48** 285103
- [22] Liu S, Tian J Q, Wang L, Luo Y L, Lua W B, Sun X B 2011 *Biosens. Bioelectron.* **26** 4491



# Dual in-plane-gate coupled IZO thin film transistor based on capacitive coupling effect in KH550-GO solid electrolyte\*

Guo Li-Qiang<sup>1)2)</sup> Wen Juan<sup>1)†</sup> Cheng Guang-Gui<sup>1)</sup> Yuan Ning-Yi<sup>1)2)</sup> Ding Jian-Ning<sup>1)2)</sup>

1) (Micro/Nano Science and Technology Center, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

2) (Jiangsu Collaborative Innovation Center of Photovoltaic Science and Engineering, Changzhou University, Changzhou 213164, China)

( Received 25 April 2016; revised manuscript received 16 June 2016 )

## Abstract

Low-voltage electric-double-layer oxide-based thin-film transistors are of great prospect and investigative value in the fields of micro multi-state memory devices, detectors, electrochemical sensors, and biological synapses simulation, and so on. In addition, low-voltage electric-double-layer oxide-based thin-film transistors have increasingly attracted attention among researchers due to the characteristics of high mobility, high visible light transmittance and low temperature preparation. Currently, the researches about low-voltage electric-double-layer oxide-based thin-film transistors are broadly divided into two aspects. On the one hand, the researches focus on ZnO as a channel layer, source and drain electrode materials, then gradually develop into In, Sn and Ga oxides as well as complex oxides containing these elements, which has made tremendous progress. On the other hand, the development and research of the gate dielectric materials have received more attention. It is found that by adopting an organic/inorganic proton conductor film as the gate dielectric of low-voltage electric-double-layer oxide-based thin-film transistors, the protons in the gate dielectric will move in the direction away from gate, and finally accumulate on the surface of gate dielectric layer close to the channel layer, with the positive bias applied to the gate. In conclusion, though the researches about low-voltage electric-double-layer oxide-based thin-film transistors have already made great progress, further explorations and investigations are necessary from its wide applications. Consequently, the development of new material architecture of low-voltage electric-double-layer oxide-based thin-film transistor is one way to achieve this goal.

Silane coupling agents (3-triethoxysilylpropylamine)-graphene oxide (KH550-GO) solid electrolyte is prepared on plastic substrate by spin coating process. The electrical performances of dual in-plane-gate coupled protonic/electronic hybrid IZO thin film transistor gated by KH550-GO solid electrolyte are further studied. The results indicate that the electric-double-layer capacitance and proton conductivity of KH550-GO solid electrolyte respectively achieve  $2.03 \mu\text{F}/\text{cm}^2$  and  $6.99 \times 10^{-3} \text{ S}/\text{cm}$ , respectively. Due to high electric-double-layer capacitance and proton conductivity, protonic/electronic hybrid IZO thin film transistor gated by KH550-GO solid electrolyte has lower power consumption (its operation voltage  $\sim 2 \text{ V}$ ). Current on/off ratio of  $1.23 \times 10^7$  and field-effect mobility of  $24.72 \text{ cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$  are shown in the device. Due to the capacitive coupling effect of KH550-GO solid electrolyte, the device with the stimulus of dual in-plane-gate voltage, can effectively modulate the threshold voltage, the subthreshold swing and the field-effect mobility, and demonstrate "AND" logic operation successfully. Dual in-plane-gate coupled protonic/electronic hybrid IZO thin film transistors prepared in this paper have potential applications in the field of biosensors and artificial synapses.

**Keywords:** KH550-GO solid electrolyte, electric-double-layer effect, proton conductor film, capacitive coupling

**PACS:** 85.30.Tv, 77.55.D-, 73.61.-r

**DOI:** 10.7498/aps.65.178501

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 51402321), the Research Fund of Jiangsu Province Cultivation Base for State Key Laboratory of Photovoltaic Science and Technology, China (Grant No. SKLPSTKF201503), the Postdoctoral Research Funding Plan of Jiangsu Province, China (Grant No. 1402071B), and the Starting Foundation of Jiangsu University Advanced Talent, China (Grant No. 14JDG049).

† Corresponding author. E-mail: [wenjuan930924@sina.com](mailto:wenjuan930924@sina.com)