

文章编号: 1000-7032(2019)06-0773-08

基于复合绝缘层 SiN_x/PMMA 的有机金属-绝缘层-半导体器件

谢 强¹, 闫 闯¹, 朱阳阳¹, 孙 强¹, 王 璐¹, 王丽娟^{1*}, 孙丽晶^{2*}

(1. 长春工业大学 化学工程学院, 吉林 长春 130012; 2. 长春工业大学 材料科学与工程学院, 吉林 长春 130012)

摘要: 为改善有机半导体器件的界面性能,在氮化硅层上旋涂聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)构成复合绝缘层。首先,利用原子力显微镜研究了不同浓度的PMMA复合绝缘层的表面形貌及粗糙度。接着,蒸镀六联苯(*p*-6P)、酞菁铜和金电极,构成有机的金属-绝缘层-半导体(MIS)器件。最后,研究了MIS器件的回滞效应及电性能。实验结果表明,复合绝缘层的粗糙度为单绝缘层的1/5,大约1.4 nm。复合绝缘层上的*p*-6P薄膜随着PMMA浓度增加形成更大更有序的畴,但单绝缘层上薄膜呈无序颗粒状。复合绝缘层的有机MIS器件几乎没有回滞现象,但单绝缘层的器件最大回滞电压约为12.8 V,界面陷阱电荷密度约为 $1.16 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ 。复合绝缘层有机薄膜晶体管的迁移率为 $1.22 \times 10^{-2} \text{ cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$,比单绝缘层提高了60%,饱和电流提高了345%。基于复合绝缘层的MIS器件具有更好的界面性能和电性能,可应用到有机显示领域。

关键词: 复合绝缘层; 金属-绝缘层-半导体; 聚甲基丙烯酸甲酯; 氮化硅; 回滞效应

中图分类号: O649

文献标识码: A

DOI: 10.3788/fjxb20194006.0773

Organic Metal-insulator-semiconductor Devices Based on Compound Insulation Layers of SiN_x/PMMA

XIE Qiang¹, YAN Chuang¹, ZHU Yang-yang¹, SUN Qiang¹, WANG Lu¹, WANG Li-juan^{1*}, SUN Li-jing^{2*}

(1. School of Chemical Engineering, Changchun University of Technology, Changchun 130012, China;

2. School of Materials Science and Engineering, Changchun University of Technology, Changchun 130012, China)

* Corresponding Authors, E-mail: wlj15@163.com; 11790976@qq.com

Abstract: In order to improve the interfacial properties of organic semiconductor devices, polymethyl methacrylate (PMMA) was spin-coated on the silicon nitride insulation layers to fabricate a compound insulation layers. First, the surface topography and roughness of composite insulation layers with different PMMA concentration were investigated by atomic force microscope. Then, the organic metal-insulation-semiconductor (MIS) devices were fabricated by vacuum evaporating of para-hexaphenyl (*p*-6P), phthalocyanine copper and the gold material electrodes, respectively. Finally, the hysteresis effect and electrical properties of MIS devices were studied. The experimental results show that the roughness of the compound insulation layers was lower than 1/5 of the single insulating layers and was about 1.4 nm. The *p*-6P films can form the larger and more ordered domains on the compound insulation layers with the increase of PMMA concentration, but it is formed spherical islands on the single insulating layers. The organic MIS devices of the compound insulation layers have almost no hysteresis, but the devices of single insulation layers have the largest hysteresis voltage of about 12.8 V and its internal trap charge density is about $1.16 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$. The mobility of

收稿日期: 2018-07-09; 修订日期: 2018-09-26

基金项目: 国家自然科学基金(21403016); 吉林省科技厅重点攻关项目(20170204014SF); 吉林省教育厅项目(JKH20191316KJ)资助
Supported by National Natural Science Foundation of China(21403016); Key Program for Science and Technology Development of Jilin Province(20170204014SF); Scientific Research Foundation of Education Department of Jilin Province(JKH20191316KJ)

MIS devices with the compound insulation layers is $1.22 \times 10^{-2} \text{ cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$, which is 60% higher than that of MIS devices of the single insulation layers. The saturation currents are increased by 345%. The MIS devices based on the compound insulation layers have better interface performance and electrical performance which can be applied to the field of organic display.

Key words: compound insulation layers; metal-insulator-semiconductor; polymethyl methacrylate; silicon nitride; hysteresis effect

1 引 言

金属-绝缘层-半导体(MIS)是有机薄膜晶体管(OTFTs)^[1]的主要结构,广泛应用于柔性导电器件^[2]、二极管^[3]、太阳能电池^[4]、电容器^[5]和紫外探测器^[6]等器件结构中。基于新型二维纳米材料的 MIS 二极管也展现了很高的光电流^[7]。酞菁铜(CuPc)是金属酞菁材料的一种,是制备 OTFTs、气体传感器^[8]等器件的有机半导体层材料^[9-10],有着优异的电特性^[11-12]。*p*-六联苯(*p*-6P)在衬底上呈层状生长,可以提供一个连续性较好的生长平面^[13],对有源层的生长有着很好的诱导作用^[14-15],能够诱导有机材料生长成连续性更好的有机半导体薄膜层^[16]。氮化硅(SiN_x)材料具有较好的化学稳定性和电学稳定性,常用作器件衬底或者绝缘层^[17-18]。聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)作为重要的聚合物材料,有着很好的电学性能^[19],可用于制备湿度传感器的超细纤维材料^[20]和 OFETs 的栅极绝缘层^[21],与半导体材料混合制备稳定的薄膜晶体管^[22]。因此,复合绝缘层 SiN_x/PMMA 有望提高有机薄膜器件性能。

本文采用复合绝缘层 SiN_x/PMMA 结合 *p*-6P 诱导生长 CuPc 构成了有机 MIS 的半导体层,与单绝缘层 SiN_x 对比,研究了复合绝缘层及有机半导体薄膜的原子力显微形貌以及 MIS 器件的电容、薄膜晶体管的转移输出等器件性能。

2 实 验

2.1 材料

SiN_x 衬底购于上海天马微电子有限公司,衬底包括玻璃基底,厚度为 200 ~ 300 nm 的铝/钕(Al/Nd)栅极层,表面覆盖 SiN_x 绝缘层。聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA, 固体颗粒)和酞菁铜(CuPc, 纯度为 95%) 购买于上海 Aladdin 公司。*p*-六联苯(*p*-6P, 纯度为 99%) 购买于东京化成工业株式

会社。其中,CuPc 和 *p*-6P 均没有二次提纯,PMMA 使用时直接溶于三氯甲烷溶液。

2.2 复合绝缘层及有机薄膜的制备

SiN_x 衬底依次用丙酮、乙醇、去离子水进行冲洗,氮气吹干后,在 80 °C 烘箱中烘干 1 h。PMMA 颗粒用三氯甲烷溶剂溶解,配制成不同浓度的 PMMA 溶液,静置溶解 10 h 左右。使用前用磁力搅拌器搅拌 1 min 后旋涂在单绝缘层 SiN_x 衬底上。采用匀胶机,前转速度为 300 r/min,时间为 6 s,后转速度为 1 000 r/min,时间为 30 s 旋涂,烘干固化成膜,形成第二层绝缘层,与第一层绝缘层 SiN_x 构成复合绝缘层。

采用真空蒸镀的方法,在衬底温度 180 °C 和真空度 6.0×10^{-4} Pa 以下,连续蒸镀有机薄膜 *p*-6P 和 CuPc。*p*-6P 的蒸镀速度为 0.1 nm/min,蒸镀厚度为 3 nm。CuPc 平均蒸镀速度为 0.3 nm/min,蒸镀厚度为 20 nm。采用掩膜板遮挡,在真空度 8.0×10^{-4} Pa 以下,蒸镀圆点金电极或者矩形金电极。圆点电极半径为 1 mm;矩形金电极沟道长为 5 mm,宽为 0.25 mm,长宽比为 20。

2.3 绝缘层及有机 MIS 器件的表征方法

绝缘层及有机薄膜 *p*-6P 的表面形貌表征采用日本精工株式会社的 SPA300HV 原子力显微镜(AFM, Seiko Instruments Industry, Co. Ltd. Japan.), SPI3800 控制器,扫描方式为敲击模式(Tapping mode)。MIS 样品的电容电导电阻特性测试采用 Agilent E4980A 的 LCR 阻抗测试仪,在暗态电屏蔽箱内室温条件下测试。扫描电子显微镜(SEM)采用的是美国 FEI 公司的 XL-30 场发射环境扫描电子显微镜。转移特性和输出特性采用吉时利的 2 636 A 双通道电流检测设备,室温大气环境下测试。

3 结果与讨论

3.1 复合绝缘层 SiN_x/PMMA 及诱导层 *p*-6P 表面形貌的研究

首先研究了单绝缘层 SiN_x 的表面 AFM 形貌

及表面粗糙度,如图 1。单绝缘层 SiN_x 的表面呈颗粒状,表面粗糙度为 7.7 nm 以上。表明 SiN_x 表面的连续性和规整度比较低,阻碍有机薄膜的成核及生长,难以形成高有序的有机薄膜。

为降低单绝缘层 SiN_x 的表面粗糙度,采用聚

合物 PMMA 修饰 SiN_x 层表面。不同质量浓度的 PMMA 溶液旋涂到单绝缘层 SiN_x 上,形成复合绝缘层 SiN_x/PMMA,如图 2。随着 PMMA 溶液浓度的增加,突起的颗粒数量和密度大幅度降低,界面连续性不断改善,如图 2(a) ~ (e)。当 PMMA 溶

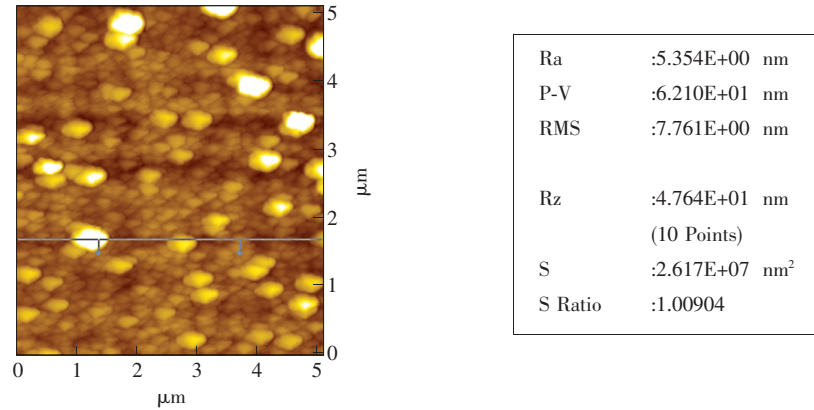


图 1 单绝缘层 SiN_x 的 AFM 形貌图及表面粗糙度

Fig. 1 AFM morphology and surface roughness of the SiN_x single insulation layers

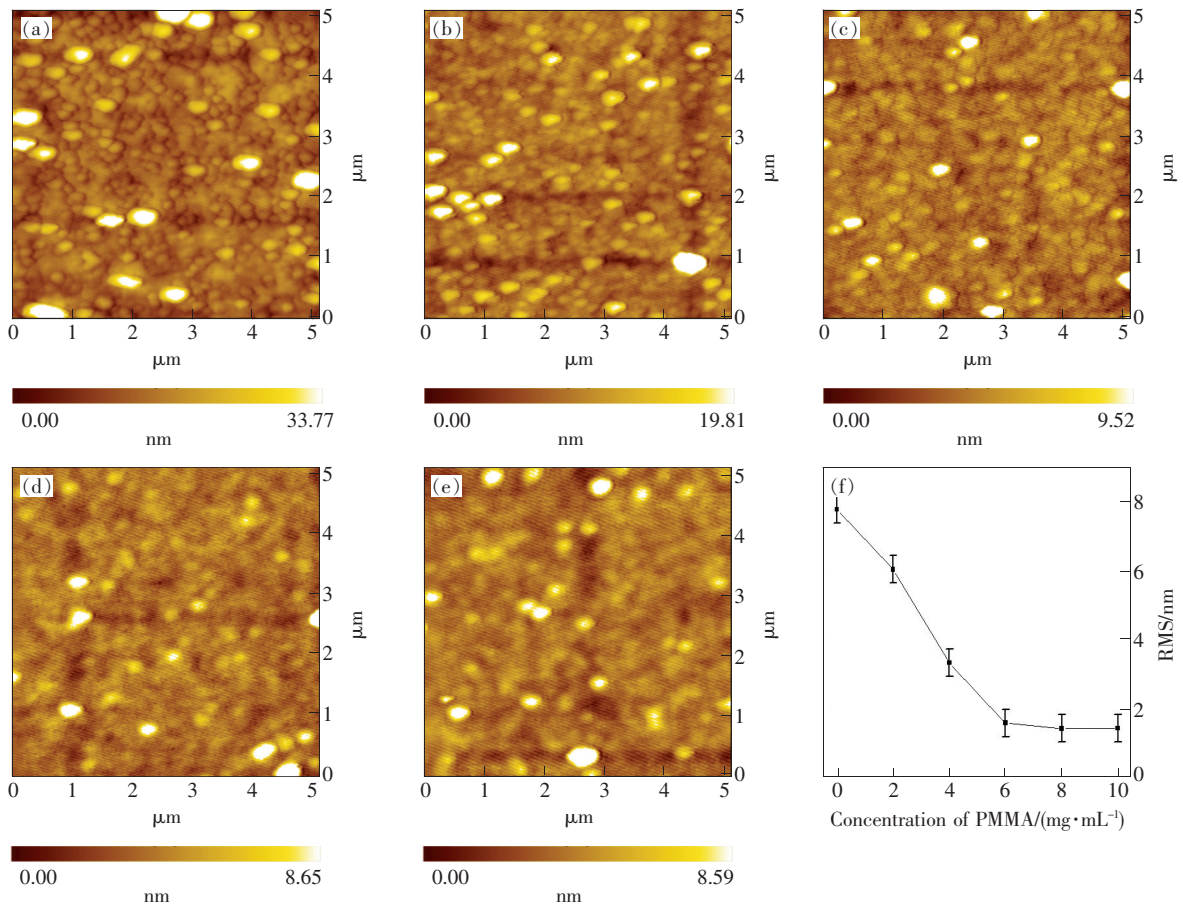


图 2 不同 PMMA 溶液浓度的复合绝缘层 SiN_x/PMMA AFM 形貌图和表面粗糙度曲线图。(a) ~ (e) PMMA 溶液浓度分别为 2, 4, 6, 8, 10 mg/mL; (f) 表面粗糙度随 PMMA 溶液浓度变化的曲线图。

Fig. 2 AFM morphology and surface roughness curves of the SiN_x/PMMA compound insulation layers with different concentration of PMMA solution. (a) - (e) PMMA solution concentrations are 2, 4, 6, 8, 10 mg/mL, respectively. (f) Curves of roughness with PMMA solution concentrations.

液浓度低于 6 mg/mL 时,复合绝缘层 SiN_x/PMMA 表面粗糙度呈直线下降,趋势非常明显,如图 2(f)。粗糙度从单绝缘层 SiN_x 的 7.7 nm 以上降低到 1.6 nm 左右。当 PMMA 溶液浓度大于 6 mg/mL 之后,粗糙度的下降趋势变缓。在 8 mg/mL 时,粗糙度为 1.4 nm 左右,为 SiN_x 的 1/5 以下。因此,聚合物 PMMA 层有效地解决了单绝缘层 SiN_x 的表面不规整和连续性较差的缺陷,降低了表面粗糙度,形成了良好的界面层。

为研究复合绝缘层 SiN_x/PMMA 对有机薄膜生长的影响,在不同 PMMA 溶液浓度的复合绝缘层上分别蒸镀厚度为 3 nm 的有机诱导层 p -6P,如图 3。在单绝缘层 SiN_x 上的有机诱导层 p -6P 薄膜(图 3(a))依然是类似 SiN_x 的颗粒状形貌,没有形成连续的 p -6P 薄膜,是因为单绝缘层 SiN_x 的表面有着较高的粗糙度,蒸镀的 p -6P 分子几乎都填充到凸凹不平的 SiN_x 缺陷中。当 PMMA 溶液

浓度为 2 mg/mL 时(图 3(b)), p -6P 分子开始聚集形成连续的薄膜,但是颗粒状的 SiN_x 仍然清晰可见。当 PMMA 溶液浓度大于 4 mg/mL 时(图 3(c)~(f)), p -6P 分子生长形成具有边界清晰的第一层有序畴,而第二层畴刚刚开始成核,还未形成。随着 PMMA 溶液浓度增大,第一层畴的尺寸增大,第二层的晶核变少。 p -6P 分子的有序生长归因于复合绝缘层粗糙度的降低。当 PMMA 溶液浓度低时,表面粗糙度较大,严重制约有机分子的自由扩散,限制了有机分子的成核和生长过程。当 PMMA 溶液浓度增大时,表面粗糙度降低,有利于有机分子在衬底表面的气相扩散。这种现象类似于栅极绝缘层表面粗糙度对有机层薄膜晶体排列的影响^[23]。因此,在单绝缘层 SiN_x 上旋涂一定浓度的 PMMA 溶液,形成复合绝缘层 SiN_x/PMMA ,有利于 p -6P 有机薄膜的生长,形成有序连续性较好的有机诱导层。

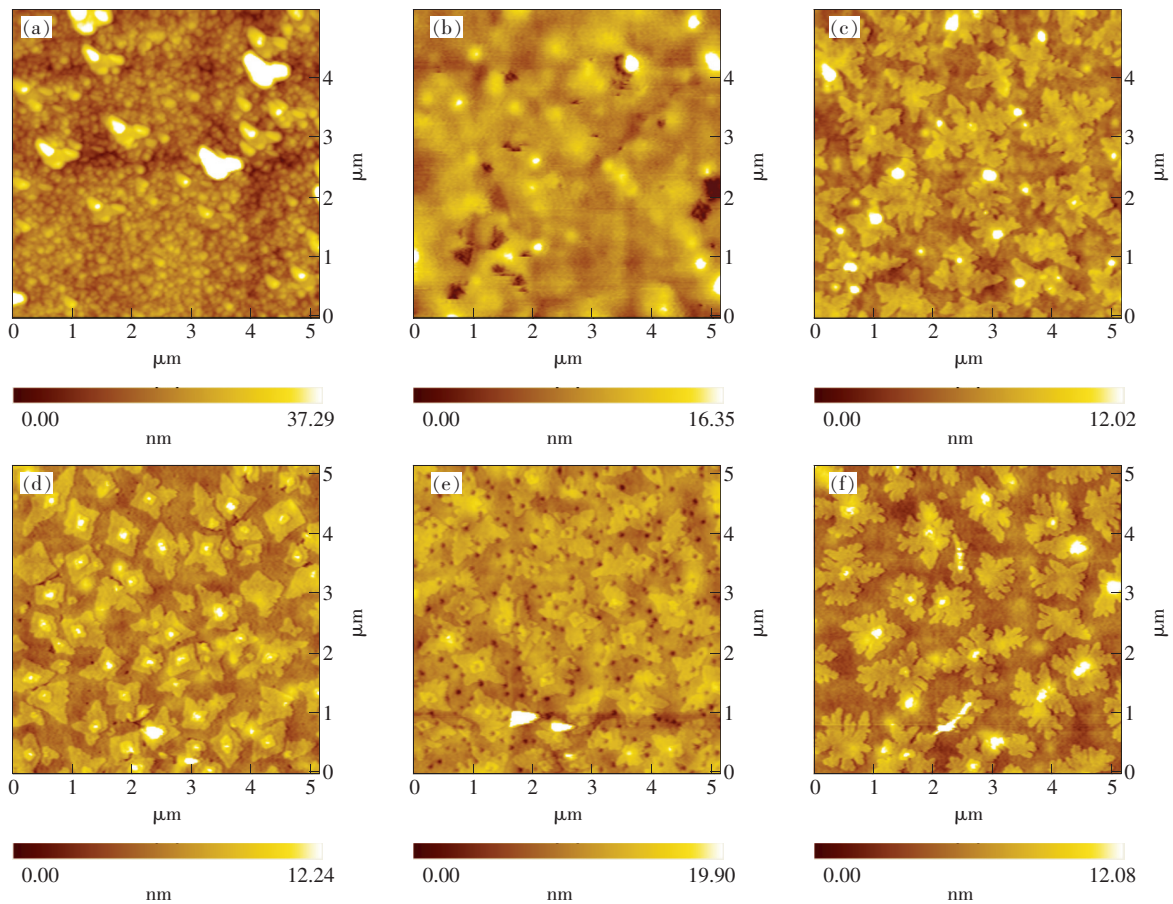


图 3 在不同绝缘层上蒸镀 3 nm 诱导层 p -6P 的 AFM 形貌图。(a)单绝缘层 SiN_x ; (b)~(f) PMMA 溶液浓度分别为 2, 4, 6, 8, 10 mg/mL 的复合绝缘层 SiN_x/PMMA 。

Fig. 3 AFM morphology of 3 nm p -6P films on different insulating layers. (a) SiN_x single insulation layers. (b)~(f) SiN_x/PMMA compound insulation layers which concentrations of PMMA solution are 2, 4, 6, 8, 10 mg/mL, respectively.

3.2 复合绝缘层的 p-6P/CuPc 有机 MIS 器件的回滞特性

为研究复合绝缘层对有机半导体性能的影响, 对比了单层绝缘层 SiN_x/p-6P/CuPc 和复合绝缘层 SiN_x/PMMA/p-6P/CuPc 有机 MIS 器件的回滞特性, 如图 4。在测试频率为 1 000 Hz 时, 扫描电压 V_G 从 +40 V 到 -40 V 正扫描, 然后又从 -40 V 到 +40 V 返回扫描, 步长为 0.8 V, 来研究电容-电压曲线的回滞特性。单绝缘层 SiN_x/p-6P/CuPc 有机 MIS 器件有明显的回滞现象, 回滞电压 ΔV_h ≈ 12.8 V。由此可以计算陷阱电荷密度^[24]:

$$N_t = C_{ox} \Delta V_h / q, \quad (1)$$

其中 C_{ox} 是绝缘层电容, q 是电子电荷量。通过公式(1)得到单绝缘层有机 MIS 器件的陷阱电荷密度大约为 1.16 × 10¹² cm⁻²。大量缺陷形成的陷阱会捕获传输电荷, 影响器件性能^[25]。因此, 在单绝缘层 SiN_x 上生长的 MIS 器件中存在大量的缺陷, 在随扫描电压正扫描的过程中从耗尽到积累区变化, 大量的载流子被陷阱俘获, 在返回扫描过程中不能快速的释放, 表现出明显的回滞特性。

但同样测试条件下, 采用表面粗糙度最低的 8 mg/mL PMMA 修饰单绝缘层 SiN_x 表面后, 构成的复合绝缘层 SiN_x/PMMA 上生长 p-6P/CuPc 的有机 MIS 器件, 电容-电压 (C-V) 曲线没有明显的回滞现象, 如图 4。说明复合绝缘层与有机半导体层有很低的界面陷阱, 利于有机半导体薄膜的载流子传输, 这与形貌观察的结果一致。

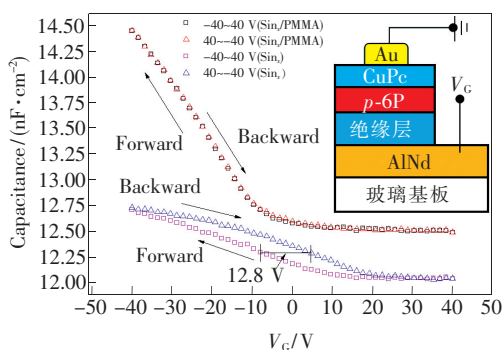


图 4 单绝缘层 SiN_x 和复合绝缘层 SiN_x/PMMA 的 p-6P/CuPc 有机 MIS 器件的结构图及 C-V 回滞曲线 (测试频率为 1 000 Hz)

Fig. 4 Structure and C-V hysteresis curves of the p-6P/CuPc organic MIS devices based on the SiN_x single insulation layers and the SiN_x/PMMA compound insulation layers (test frequency is 1 000 Hz)

3.3 复合绝缘层的 SEM 断面图及薄膜晶体管电特性

为确定复合绝缘层的厚度, 采用扫描电子显微镜 (SEM) 对 MIS 器件的断面进行分析, 如图 5。SiN_x 的厚度大约为 805 nm (如图 5(a)), 溶液浓度 2 mg/mL 和 8 mg/mL 的 PMMA 旋涂制备的复合绝缘层 SiN_x/PMMA 厚度相差不大, 约为 970 nm (图 5(b) ~ (c)), 因此 PMMA 层的厚度在 170 nm 左右。在浓度为 2 ~ 10 mg/mL 范围内, PMMA 浓度对厚度基本没有影响。

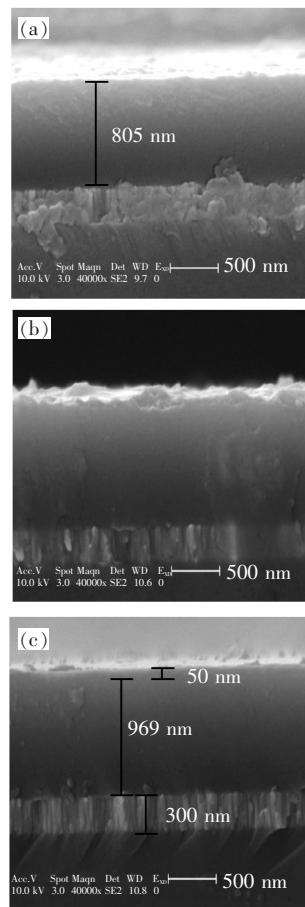


图 5 单绝缘层 SiN_x (a) 和 PMMA 浓度分别为 2 mg/mL (b)、8 mg/mL (c) 的复合绝缘层 SiN_x/PMMA 有机 MIS 器件 SEM 断面图。

Fig. 5 SEM images of organic MIS devices. (a) SiN_x single insulation layers. (b) and (c) SiN_x/PMMA compound insulation layers of PMMA concentrations with 2 mg/mL and 8 mg/mL.

对比研究了复合绝缘层 SiN_x/PMMA 与单绝缘层 SiN_x 的薄膜晶体管的转移性能和输出性能, 如图 6。在不同栅极电压下, 复合绝缘层有机 MIS 器件有着更高的输出电流, 在栅极电压 V_{GS} = -80 V 时, 饱

和电流大约比单层 SiN_x 提升了 345%, 如图 6(a)。

转移特性的饱和区电流公式为:

$$I_{\text{DS}} = (W/2L) \mu C_{\text{ox}} (V_{\text{GS}} - V_{\text{TH}})^2, \quad (2)$$

其中 μ 是迁移率, 单位为 $\text{cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$, L 和 W 分别为沟道的长和宽, C_{ox} 为器件绝缘层电容。通过公式(2)计算得到单绝缘层 $\text{SiN}_x/p\text{-6P}/\text{CuPc}$ 有机 MIS 器件的迁移率为 $7.63 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$; 复合绝缘层 $\text{SiN}_x/\text{PMMA}/p\text{-6P}/\text{CuPc}$ 有机 MIS 器件的迁移率为 $1.22 \times 10^{-2} \text{ cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$, 较之单绝缘层提升了 60%, 如图 6(b)。饱和电流和迁移率的提高与回滞特性获得的结论一致, 归因于复合绝缘层有更低的界面陷阱, 有利于空穴载流子的迁移和传输。但复合绝缘层对阈值电压影响

不大, 主要是因为复合绝缘层中 PMMA 层的厚度仅为复合绝缘层总厚度的一小部分, SiN_x 厚度依然是绝缘层的主要部分(如图 5), PMMA 层在复合绝缘层中起到界面修饰的作用, 改善了界面性质, 降低了界面缺陷。影响阈值电压的绝缘层主要部分仍是 SiN_x 绝缘层, 因此复合绝缘层对阈值电压影响不大。MIS 器件电性能的提高主要归因于复合绝缘层有利于有机诱导层 $p\text{-6P}$ 成核生长, 晶界较好, $p\text{-6P}$ 分子筹更有序, 促进了有机半导体层形成连续性更好的薄膜层, 从而提高了器件的饱和电流和载流子迁移率等电学性能。

4 结 论

本文对比研究了单绝缘层 SiN_x 以及在单绝缘层 SiN_x 表面旋涂 PMMA 溶液构成复合绝缘层 SiN_x/PMMA 制备有机 MIS 器件的形貌和电性能。单绝缘层 SiN_x 表面有着很高的粗糙度, 大约 7.7 nm, 旋涂 PMMA 溶液后, 粗糙度降低到了 1.4 nm 左右, 为单绝缘层的 1/5。相比于单绝缘层 SiN_x , 复合绝缘层 SiN_x/PMMA 更有利于有机诱导层 $p\text{-6P}$ 的生长, 能够形成规则的有序畴, 从而得到连续性更好、缺陷更少的半导体有机层 CuPc。单绝缘层 SiN_x 有机 MIS 器件 $C\text{-V}$ 曲线具有较大的回滞现象, 复合绝缘层 $\text{SiN}_x/\text{PMMA}/p\text{-6P}/\text{CuPc}$ 有机 MIS 器件没有明显的回滞现象。基于复合绝缘层 SiN_x/PMMA 的 $p\text{-6P}/\text{CuPc}$ 有机薄膜晶体管的转移输出性能更高, 迁移率为 $1.22 \times 10^{-2} \text{ cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$, 提高了 60%, 栅极电压 $V_{\text{GS}} = -80 \text{ V}$ 时, 饱和电流提高了 345%。因此, 复合绝缘层 SiN_x/PMMA 制备的有机 MIS 器件在光电子器件和大面积集成电路及柔性显示方面具有很好的应用前景。

致谢:感谢中国科学院长春应用化学研究所原子力显微镜、电子扫描显微镜以及 LCR 阻抗测试仪等测试方面给予的帮助。

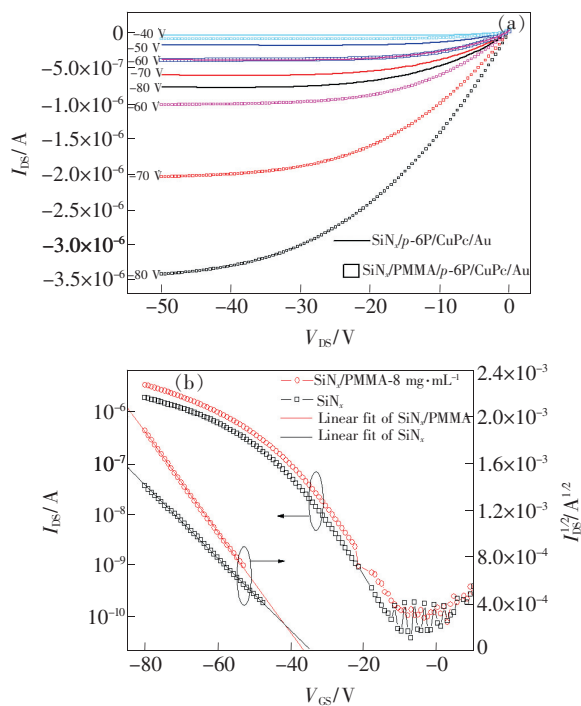


图 6 单绝缘层 SiN_x 和复合绝缘层 SiN_x/PMMA 的输出特性曲线(a)和转移特性曲线图(b) ($V_{\text{DS}} = -50 \text{ V}$)

Fig. 6 Output curves (a) and transfer curves (b) ($V_{\text{DS}} = -50 \text{ V}$) of the SiN_x single insulation layers and the SiN_x/PMMA compound insulation layers

参 考 文 献:

- [1] MENESES C, SANCHEZ J G, ESTRADA M, *et al.*. Characterization of MIS structures and PTFTs using TiO_x deposited by spin-coating [J]. *Microelectron. Reliab.*, 2014, 54(5):893-898.
- [2] SUNG S, PARK S, LEE W J, *et al.*. Low-voltage flexible organic electronics based on high-performance sol-gel titanium dioxide dielectric [J]. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2015, 7(14):7456-7461.
- [3] JEONG H, OH H M, BANG S, *et al.*. Metal-insulator-semiconductor diode consisting of two-dimensional nanomaterials

- [J]. *Nano Lett.*, 2016,16(3):1858-1862.
- [4] OENER S Z, VAN DE GROEP J, MACCO B, *et al.*. Metal-insulator-semiconductor nanowire network solar cells [J]. *Nano Lett.*, 2016,16(6):3689-3695.
- [5] MONTAÑEZ L M, MÜLLER K, HEINKE L, *et al.*. Integration of thin film of metal-organic frameworks in metal-insulator-semiconductor capacitor structures [J]. *Microporous Mesoporous Mater.*, 2018,265:185-188.
- [6] 尤坤,宋航,黎大兵,等. GaN 基 MIS 紫外探测器的电学及光电特性 [J]. *发光学报*, 2012,33(1):55-61.
YOU K, SONG H, LI D B, *et al.*. Electrical and optoelectronics characteristics of GaN based MIS photo-detectors [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2012,33(1):55-61. (in Chinese)
- [7] HA Y G, JEONG S, WU J S, *et al.*. Flexible low-voltage organic thin-film transistors enabled by low-temperature, ambient solution-processable inorganic/organic hybrid gate dielectrics [J]. *J. Am. Chem. Soc.*, 2010,132(49):17426-17434.
- [8] 李占国,张玉婷,谢强,等. 基于 *p*-6P 异质诱导生长酞菁铜薄膜的 NO₂ 传感器 [J]. *物理化学学报*, 2016,32(4):1005-1011.
LI Z G, ZHANG Y T, XIE Q, *et al.*. NO₂ sensors based on *p*-6P heterogametic induction growth of copper phthalocyanine thin films [J]. *Acta Phys. Chim. Sinica*, 2016,32(4):1005-1011. (in Chinese)
- [9] HU Y L, GU W, LIU N, *et al.*. Fabricating organic transistors based on domain-ordered copper phthalocyanine film grown on oligothiophene epitaxial substrate [J]. *Phys. Status Solidi Rapid Res. Lett.*, 2013,7(8):558-561.
- [10] GUI H Y, WEI B, WANG J. High sensitivity and air stability in an organic transistor-based biosensor by inserting a CuPc layer [J]. *Phys. Status Solidi Rapid Res. Lett.*, 2014,211(11):2499-2502.
- [11] CHIU Y C, CHEN B H, JAN D J, *et al.*. Growth behavior of CuPc films by physical vapor deposition [J]. *Cryst. Res. Technol.*, 2011,46(3):295-299.
- [12] ZHANG X W, HAN G R. Preparation and photoconductive properties of vacuum-sublimed CuPc/ZnS multilayer films [J]. *Phys. Status Solidi A*, 2003,195(2):359-366.
- [13] ZHANG Y, WEI X C, ZHANG H, *et al.*. Ambipolar organic transistors with high on/off ratio by introducing a modified layer of gate insulator [J]. *Appl. Surf. Sci.*, 2018,427:452-457.
- [14] QIAN C, SUN J, KONG L A, *et al.*. High-performance organic heterojunction phototransistors based on highly ordered copper phthalocyanine/para-sexiphenyl thin films [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2017,27(6):1604933-1-8.
- [15] MA F, WANG S R, LI X G. Synthesis, spectral characterization of CuPcF₁₆ and its application in organic thin film transistors using *p*-6P as inducing layer [J]. *J. Phys. Chem. Solids*, 2012,73(4):589-592.
- [16] WANG H, ZHU F, YANG J, *et al.*. Weak epitaxy growth affording high-mobility thin films of disk-like organic semiconductors [J]. *Adv. Mater.*, 2007,19(16):2168-2171.
- [17] KAMAL R, CHANDRAVANSI P, CHOI D K, *et al.*. The effect of annealing in forming gas on the a-IGZO thin film transistor performance and valence band cut-off of IGZO on SiN_x [J]. *Curr. Appl. Phys.*, 2015,15(5):648-653.
- [18] 郭永林,梁续旭,胡守成,等. Al₂O₃ 薄层修饰 SiN_x 绝缘层的 IGZO-TFTs 器件的性能研究 [J]. *发光学报*, 2015,36(8):947-952.
GUO Y L, LIANG X X, HU S C, *et al.*. Improvement of IGZO-TFTs performance with SiN_x gate insulator modified by Al₂O₃ film [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2015,36(8):947-952. (in Chinese)
- [19] GARCÍA B, OCAMPO M A, LUNA-BÁRCENAS G, *et al.*. Structural and electrical characterization of isotactic PMMA thin films deposited by spin coating [J]. *Macromol. Symp.*, 2009,283-284(1):342-347.
- [20] IRAWATI N, ABDULLAH T N R, RAHMAN H A, *et al.*. PMMA microfiber loop resonator for humidity sensor [J]. *Sens. Actuators A Phys.*, 2017,260:112-116.
- [21] 石晓东,王伟,李春静,等. Ta₂O₅-PMMA 复合栅绝缘层对 OFETs 性能的影响 [J]. *发光学报*, 2017,38(1):70-75.
SHI X D, WANG W, LI C J, *et al.*. Effect of Ta₂O₅-PMMA compound gate insulator on the performance of organic field effect transistors [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2017,38(1):70-75. (in English)
- [22] SOEDA J, OKAMOTO T, MITSUI C, *et al.*. Stable growth of large-area single crystalline thin films from an organic semiconductor/polymer blend solution for high-mobility organic field-effect transistors [J]. *Org. Electron.*, 2016,39:127-132.
- [23] YANG H, YANG C, KIM S H, *et al.*. Dependence of pentacene crystal growth on dielectric roughness for fabrication of

flexible field-effect transistors [J]. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2010,2(2):391-396.

[24] WANG L J, LIU G J, WANG H B, *et al.*. Electrical properties in vanadyl-phthalocyanine-based metal-insulator-semiconductor devices [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2007,91(15):153508-1-3.

[25] BLÜLLE B, HÄUSERMANN R, BATLOGG B. Approaching the trap-free limit in organic single-crystal field-effect transistors [J]. *Phys. Rev. Appl.*, 2014,1(3):034006-1-7.



谢强(1993 -),男,山东滨州人,硕士研究生,2017年于长春工业大学获得学士学位,主要从事有机薄膜晶体管及应用的研究。

E-mail: 1277447430@qq.com



孙丽晶(1979 -),女,吉林梨树县人,硕士,副教授,2005年于长春理工大学获得硕士学位,主要从事有机薄膜生长、太阳能电池、新型发光显示技术及微电子装置等的研究。

E-mail: 11790976@qq.com



王丽娟(1975 -),女,黑龙江集贤县人,博士,副教授,博士生导师,2008年于长春理工大学获得博士学位,主要从事有机薄膜晶体管、太阳能电池、新型显示技术等研究。

E-mail: wlj15@163.com