

文章编号:1007-2780(2016)04-0380-06

薄膜晶体管中绝缘层的研究现状与趋势

王东平, 谢应涛, 欧阳世宏, 朱大龙, 许鑫, 谭特, 方汉铨*

(上海交通大学 电子工程系 TFT-LCD 关键材料及技术国家工程实验室, 上海 200240)

摘要:本文主要介绍了绝缘层在薄膜晶体管中的重要作用,总结了在薄膜晶体管中应用的绝缘层材料种类及其特点,介绍了不同绝缘层的制备工艺,以及各种制备工艺的原理与特点。最后,通过分析近几年有关薄膜晶体管绝缘层的文献,介绍了薄膜晶体管在制备过程中遇到的主要问题及当前的研究热点,并对未来薄膜晶体管中绝缘层的制备工艺和绝缘材料的研究方向进行了展望。

关键词:薄膜晶体管;溶胶凝胶法;紫外光退火;低温工艺

中图分类号: TN321.5 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/YJYXS20163104.0380

Research status and trends of insulating layer in thin-film transistor

WANG Dong-ping, XIE Ying-tao, OUYANG Shi-hong, ZHU Da-long,
XU Xin, TAN Te, FONG Hon-hang

(National Engineering Lab for TFT-LCD Key Materials and Technologies
Department of Electronic Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: This paper mainly describes the important role of thin film transistor dielectric, and summarizes the dielectric material type and its characteristics in the thin film transistor application, describes the preparation process of different insulation layers, and the principle and characteristic between different processes. Finally, through analysis of the latest literature on thin film transistor dielectric, the paper summarizes the main problems encountered in the preparation process and the current research focus, and finally prospects the future research directions of the technology for preparing thin film transistors and the dielectric materials.

Key words: thin film transistor; sol-gel process; UV annealing; low temperature process

1 引言

晶体管是人类 20 世纪最伟大的发明之一, 1947 年, 美国贝尔实验室由肖克莱、巴丁和布拉

顿组成的研究小组, 研制出了一种点接触型锗晶体管, 虽然这种晶体管与当时的真空电子管相比性能很差, 但却是微电子革命的先声, 人们可以用一个小巧的、低功耗的电子器件来代替体积大、功耗大的电子管, 因此晶体管的出现引起了人们的

重视,并掀起了一股研究热潮。1961年,美国无线电公司的保罗·魏玛研究组首次提出了薄膜晶体管的概念,他们发现可以将半导体材料蒸镀在绝缘层上来构筑晶体管,这项技术的实现可以在一张邮票大小的基板上构筑数千个晶体管,大大提高了晶体管的集成度。

目前,薄膜晶体管的研究大多集中在迁移率高、溶液加工性好的半导体材料的开发上,但随着对薄膜晶体管研究的不断开展和认识的不断加深,人们发现优化半导体层并不是唯一的途径,选择合适的绝缘层材料并优化其制备方法也是至关重要的。晶体管工作时,在栅极电场作用下,载流子会在绝缘层和半导体层界面聚集形成导电沟道,从微观上讲,绝缘层的性能决定了界面电荷的堆叠情况,进而会影响器件的静态、动态特性和可靠性等,从宏观上讲,绝缘层又影响着薄膜晶体管的电流密度、功耗和响应速度等参数^[1-2]。

2 绝缘材料分类

绝缘材料可分为无机绝缘材料和有机绝缘材料两大类。

2.1 无机绝缘材料

在薄膜晶体管介质中常用的无机绝缘材料主要是氧化物,另外也有氮化物和金属盐类等。

氧化物绝缘材料有耐高温、化学性质稳定、不易被击穿等优点,二氧化硅(SiO_2)是最常见的一种氧化物绝缘材料,其禁带较宽,物理化学稳定性好,具有良好的绝缘层/半导体界面,可通过对硅基片进行热处理获得^[3]。另外氧化铝(Al_2O_3)也是一种常见的用于氧化物 TFT 的绝缘材料,多篇文献验证了通过原子层外延(ALD)和化学气相沉积(CVD)制备的基于氧化铝绝缘层的氧化物 TFT 也具有有良好的晶体管特性和稳定性^[4-7]。

氮化物方面,有文献报道用氮化硅(Si_3N_4)和氮化铝(AlN)作为绝缘层制备了具有良好性能的薄膜晶体管,但氮化物中的氮原子会扩散到氧化物半导体层中,尤其是在对氧化物进行高温退火处理后,因此以氮化物为绝缘层制备的薄膜晶体管在器件稳定性方面还有待进一步改进^[8-9]。

随着晶体管集成度的提高,半导体器件的特征尺寸按照摩尔定律不断减小,以 MOS 晶体管为例,它由源极(Source)、漏极(Drain)、栅极

(Gate)及连接源漏极的半导体导电沟道组成,其中栅极就像一个开关,控制着导电沟道中电流的大小,栅极的控制能力主要由栅极电容值决定,栅极与沟道间用绝缘层隔开,构成了栅极电容的主体。随着 MOS 晶体管结构尺寸的缩小,为了保持栅极对沟道电流的调控能力,需要在尺寸缩小的同时维持栅极电容的容量,这一般通过减小栅极和沟道之间的绝缘层厚度来实现,但由此引起的栅极和沟道间漏电流的问题也越来越突出^[10-11]。

为解决这一问题,High-K 材料逐渐被人们所关注,因其具有较高的介电常数,介质对电子的束缚能力更强,与传统绝缘材料相比,绝缘层可以做的更薄而不增加漏电流,满足了进一步降低器件尺寸的要求^[12]。文献报道的 High-K 材料以金属氧化物居多,主要有氧化铝(Al_2O_3)、二氧化钛(TiO_2)、氧化钇(Y_2O_3)、氧化钽(Ta_2O_5)、氧化铪(HfO)、氧化锆(ZrO)、氧化镧(La_2O_3)、氧化钪(Gd_2O_3)等,也有金属盐类如锆钛酸钡($\text{Ba-Zr}_x\text{Ti}_{1-x}\text{O}_3$,简称 BZT)、钛酸锶钡($\text{Ba}_x\text{Sr}_{1-x}\text{TiO}_3$,简称 BST)、 HfTiO_y 、 SrTiO_3 、 LaHfO_x 等^[13-15]。

2.2 有机绝缘材料

因氧化物绝缘层常需要高温退火及非柔性加工,这限制了其在柔性显示和低成本溶液加工工艺中的应用,相比而言,有机绝缘材料与柔性衬底有更好的相容性,适用于低成本的低温、溶液加工工艺,可溶性有机材料可通过简单的旋涂、提拉等方法形成高质量薄膜,并可在室温或大气环境中操作,在平板显示器件的商业化生产中,这些技术因其低功耗低成本而备受关注。近年来,有机导电材料、有机半导体材料和有机绝缘材料等聚合物都有广泛的研究和长足的发展,目前有报道用做绝缘层的聚合物材料有聚苯酚类、聚酯类、聚芳香烃类、聚有机硅氧烷类等^[16-17]。

3 绝缘层制备工艺

绝缘层材料种类繁多,性质各异,薄膜制备方法也各不相同,根据薄膜制备过程中对外界环境的要求可大体分为真空镀膜、溶液法、电化学沉积法和热氧化生长法等。

3.1 真空镀膜工艺

这里所说的真空镀膜笼统的指在成膜过程中需要真空环境或其它特殊气体环境的工艺,真空镀膜方法有很多种,在此只简单介绍常用的几种,包括真空蒸镀、磁控溅射、化学气相沉积、原子层沉积等^[18]。

3.1.1 真空蒸镀

真空蒸镀也叫热蒸镀法,通过直接或间接的方法加热要蒸镀的材料,达到一定的温度材料中的原子或分子就会被蒸发出来。蒸镀时真空室的压力要低于 10^{-3} Pa,在这个压力下,蒸发的原子或分子的自由程会大于真空室的壁间距,原子或分子会形成某一立体角的束流,将要蒸镀的衬底放置于束流角度内,原子或分子蒸汽就会在衬底表面凝结形成固态薄膜,如果将衬底加热,形成的薄膜会更加稳定和均匀^[19]。

真空蒸镀法适用的材料范围较广,可蒸镀金属、氧化物、有机物聚合物等,其成膜速度快、效率高,制备的薄膜纯度高、平整性好,薄膜缺陷少,且可以较准确地在线检测和控制镀膜厚度;不过由于所制备的薄膜是通过原子或分子蒸汽凝结形成的,因此薄膜与衬底的粘附性不太好,可以通过衬底表面处理或提高镀膜真空度等方法来改善粘附性。

3.1.2 磁控溅射

磁控溅射是在高真空中充入适量的氩气,在阴极(柱状靶或平面靶)和阳极(镀膜室壁或另一个靶材)之间施加高电压(几百伏到几千伏),在镀膜室内产生磁控型异常辉光放电,使氩气发生电离。氩离子被阴极加速并轰击阴极靶表面,将靶材表面原子溅射出来,然后沉积在基底表面上形成薄膜。通过更换不同材质的靶和控制不同的溅射时间,便可以获得不同材质和不同厚度的薄膜。

磁控溅射法具有镀膜层与基材的结合力强、膜层致密等优点^[20]。但溅射出来的靶材粒子能量大且带有电荷,可能会对衬底有一定的影响;相对于真空镀膜,磁控溅射的薄膜表面粗糙度较大,且膜厚难以精确控制。受镀膜原理限制,磁控溅射的靶材需要有一定的导电性,靶材材料一般为金属(如铝、铜、镉、钽等)、半导体(如硅、锗、硼等)或氧化物(如 ITO、IGZO 等)。

3.1.3 化学气相沉积

化学气相沉积(简称 CVD),是指把含有构成

薄膜元素的气态反应剂或液态反应剂的蒸气及反应所需的其它气体引入反应室,在衬底表面发生化学反应生成薄膜的过程,这种方法也常用于氧化物薄膜的制备,如二氧化钛(TiO_2)薄膜的制备就是将 TiCl_4 、水蒸气与氮气混合通过喷嘴进入反应室, TiCl_4 与水蒸气反应生成 TiO_2 分子沉积在衬底表面形成薄膜^[21]。气相反应近年来发展很快,在此基础上发展了很多新的工艺,如低压 CVD、激光 CVD、等离子体 CVD 等^[22-23]。

化学气相沉积可以制备多种金属、合金、陶瓷和化合物薄膜,薄膜的化学成分、密度、纯度随气相组成的变化而变化,可以获得梯度沉积物或混合镀膜。另外,在常压或低真空时,化学气相沉积镀膜的绕射性很好,可以在各种形状的衬底或机械部件上镀膜。这种镀膜方法的主要缺点是镀膜反应温度较高(几百甚至上千摄氏度),因此在应用上受到了一定的限制。

3.1.4 原子层沉积

原子层沉积(简称 ALD)是一种可以将物质以单原子膜形式一层一层的镀在基底表面的方法。其自限制性和互补性可以精确的控制薄膜的成份和厚度,所制备的薄膜纯度和均匀性都很高。原子层沉积与普通的化学气相沉积有相似之处,但在原子层沉积过程中,前驱体以气体脉冲的形式交替地通入反应器中,前驱体达到沉积基体表面后,它们会在其表面化学吸附并发生表面反应,每次气体脉冲之间都会用惰性气体对原子层沉积反应器进行清洗,因此新一层原子膜的化学反应是直接与之前一层相关联的,这种方式使每次反应都只沉积一层原子,这也是实现原子层沉积的关键。

由气相物质在基体材料的表面吸附特性可以知道,任何气相物质在材料表面都可以进行物理吸附,但是要实现材料表面的化学吸附必须具有一定的活化能,因此能否实现原子层沉积,选择合适的反应前驱体物质是很重要的^[4-5],目前可沉积的材料包括:氧化物,氮化物,氟化物,碳化物,硫化物等。

3.2 溶液法

溶液法制备绝缘层薄膜主要是指溶胶-凝胶法,通常先把要成膜的材料或前驱物配置成某种溶液(溶胶),将溶液(溶胶)以旋涂或提拉等方法在衬底表面附着一层溶液(溶胶)膜,然后通过加

热退火或光照退火等方法使衬底表面的溶液(溶胶)膜发生物理或化学性质的改变,形成最终想要制备的绝缘层薄膜,通过控制旋涂或提拉的速度可以控制成膜的膜厚。

相对于真空镀膜工艺对成膜环境和设备的苛刻要求,溶液法可以在大气环境中或常压下制备绝缘层薄膜,因此生产工艺简单、成本低,不过制备的薄膜也容易产生缺陷,薄膜的均匀性也难以达到真空镀膜的水平。目前除了薄膜晶体管的金属电极一般不用溶液法制备外,其它结构如绝缘层、半导体沟道层、注入层等都可以用溶液法制备。从材料上讲,很多氧化物薄膜和大部分有机聚合物薄膜都是用溶液法制备的^[24-25]。

3.3 电化学沉积法

电化学沉积法是一种液相制备薄膜的方法,将两个电极插入电解液中,加上直流电压形成电流回路,使溶液中的离子与阴极或阳极材料发生化学反应,并在电极表面生成氧化物薄膜的过程。由沉积原理可知电极需要有一定的导电性,一般为金属材料或硅等半导体材料,制备的薄膜一般为金属氧化物或半导体化合物。薄膜的形成主要包括阴极还原和阳极氧化两种方式。

电化学沉积法虽然成膜工艺简单,但影响因素却很多,薄膜性能不仅受电流、电压、溶液温度、组份、浓度、pH值的影响,还与溶液的离子强度、电极的表面活性等因素有关。另外,基体表面晶核的生成和长大速度难以控制,制得的化合物半导体薄膜一般为多晶态或非晶态,性能有限,因此这种方法一般局限于制备金属氧化物薄膜,如 Al_2O_3 、 ZnO 、 Fe_3O_4 等^[26]。

3.4 热氧化生长法

热氧化生长法主要用于硅基 SiO_2 绝缘薄膜的制备,虽然可以用化学气相沉积、磁控溅射等方法制备 SiO_2 薄膜,但在制备硅基 SiO_2 薄膜时,更多的还是采用热氧化生长法,因为热氧化生长法制备的 SiO_2 薄膜纯度高、电阻率大、均匀性好。在 SiO_2 薄膜热生长时,氧化剂能够穿透 SiO_2 层与硅发生反应生成新的 SiO_2 ,常用的氧化剂有氧气分子或水分子,根据氧化剂的不同有干氧法、水汽氧化法和湿氧法,不同的方法制备 SiO_2 薄膜的生长速度及其界面特性是不同的^[27]。在薄膜晶体管中要求 SiO_2 薄膜致密且具有一定的亲水性,因此常用湿氧法制备 SiO_2 薄膜^[28]。

4 总结与展望

随着平板显示产业化发展,人们希望用更简单的工艺、更低的成本生产出性能更好的薄膜晶体管,在薄膜晶体管的构筑中,绝缘层材料的选择与制备工艺是非常重要的,一方面场效应载流子传输沟道位于半导体材料与绝缘层材料的界面上,通常只有一个到几个分子层,就是这几个分子层的性质决定了薄膜晶体管的主要电学特性;另一方面,绝缘层性能决定了薄膜晶体管的漏电流大小,进而影响了晶体管的阈值电压、亚阈值摆幅、开关比等表征参数^[29]。

近年来文献报道的绝缘层材料主要有两大类:一类是超薄、低漏电流的 High-K 材料,基于传统绝缘材料的薄膜晶体管在器件尺度进一步减小时漏电流会急剧增加,High-K 材料是减小薄膜晶体管漏电流的首选方案,主要以金属氧化物或金属盐类为主,有文献报道氧化锆绝缘层在 5 nm 时依然具有良好的绝缘特性,基于此绝缘层的薄膜晶体管也具有有良好的性能参数^[33];另一类是以聚合物为主的有机绝缘层材料,相对于无机绝缘材料,有机绝缘材料加工温度低,工艺流程简单,与柔性基板有很好的相容性,因此在低成本、大面积柔性显示等领域拥有巨大的潜在应用价值,也是一个研究热点。文献报道的有机绝缘材料主要有聚酰亚胺(PI)、聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)、聚对乙烯基苯酚(PVP)、聚乙烯醇(PVA)、聚有机硅氧烷(R-SiO_x)、聚乙烯苯酚(PS)、氰乙基普鲁士蓝(CYEPL)等^[30-32]。

绝缘层制备工艺方面,因产业化对低成本、低功耗的要求,各种绝缘材料的溶液法制备工艺一直备受关注^[33-36],绝缘层材料溶液或前驱物溶液在衬底表面涂覆后,常要经过高温退火工艺使绝缘层晶化或使前驱物分解,因此低温加工工艺也一直是研究热点。低温工艺的研究也包括两个方向:一个是采用加热退火的方法,通过选择不同的材料或更改溶液配方来降低加热温度;另一个是采用 UV 退火的方法,选择吸收光谱在紫外波段的材料配制成溶液,通过紫外光照使材料分解生成所需要的绝缘材料。也有两种方法相结合的工艺,即先对材料进行曝光使其性质发生改变,再对其进行加热固化;或者在紫外曝光过程中对材料

进行加热,以增加其分解速度,不论采用哪种退火方法,低温工艺已经成为一种发展趋势。

参 考 文 献:

- [1] PARK J S, KIM H, KIM I D. Overview of electroceramic materials for oxide semiconductor thin film transistors [J]. *Journal of Electroceramics*, 2013, 32(2/3): 117-140.
- [2] KIM H S, JEON S H, PARK J S, *et al.* Anion control as a strategy to achieve high-mobility and high-stability oxide thin-film transistors [J]. *Scientific Reports*, 2013, 3: 1459.
- [3] AKHAVAN O. The effect of heat treatment on formation of graphene thin films from graphene oxide nanosheets [J]. *Carbon*, 2010, 48(2): 509-519.
- [4] SWAMINATHAN S, SUN Y, PIANETTA P, *et al.* Ultrathin ALD- Al_2O_3 layers for Ge (001) gate stacks: Local composition evolution and dielectric properties [J]. *Journal of Applied Physics*, 2011, 110(9): 094105.
- [5] DINGEMANS G, TERLINDEN N M, PIERREUX D, *et al.* Influence of the oxidant on the chemical and field-effect passivation of Si by ALD Al_2O_3 [J]. *Electrochemical and Solid-State Letters*, 2011, 14(1): H1-H4.
- [6] FALLQVIST M, SCHULTHEISS F, OLSSON M, *et al.* Influence of CVD Al_2O_3 coated tool surface micro topography on the tribological characteristics in metal cutting: Part I [J]. *Wear*, 2013: 87-98.
- [7] YANG L, CHENG C W, BULSARA M T, *et al.* High mobility $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ quantum-well metal oxide semiconductor field effect transistor structures [J]. *Journal of Applied Physics*, 2012, 111(10): 104511.
- [8] O'CONNOR E, DJARA V, MONAGHAN S, *et al.* Capacitance-voltage and interface state density characteristics of GaAs and $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ MOS capacitors incorporating a PECVD Si_3N_4 dielectric [J]. *ECS Transactions*, 2011, 35(3): 415-430.
- [9] KOUTSOURELI M, ADIKIMENAKIS A, MICHALAS L, *et al.* Charging and discharging processes in ALN dielectric films deposited by plasma assisted molecular beam epitaxy [C]. *Proceedings of International Semiconductor Conference*, Sinaia: IEEE, 2012, 2: 281-284.
- [10] MANDAL L, LIN W N, LOUREMBAM J, *et al.* *Functional Metal Oxides: New Science and Novel Applications* [M]. Fairford: John Wiley & Sons, Inc, 2013: 419-442.
- [11] JEON S, PARK S, SONG I, *et al.* Nanometer-scale oxide thin film transistor with potential for high-density image sensor applications [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2011, 3(1): 1-6.
- [12] AUTH C, ALLEN C, BLATTNER A, *et al.* A 22 nm high performance and low-power CMOS technology featuring fully-depleted tri-gate transistors, self-aligned contacts and high density MIM capacitors [C]. *Proceedings of Symposium on VLSI Technology, Honolulu, HI: IEEE*, 2012: 131-132.
- [13] CHUNG D S, LEE J S, HUANG J, *et al.* Low voltage, hysteresis free, and high mobility transistors from all-inorganic colloidal nano crystals [J]. *Nano Letters*, 2012, 12(4): 1813-1820.
- [14] HOUSSA M. *High k Gate Dielectrics* [M]. New York: CRC Press, 2010.
- [15] YANH, HANAGATA H, JO T, *et al.* Low-voltage organic field-effect transistors fabricated on self-assembled monolayer-free SrTiO_3 insulator [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2011, 50(1S2): 01BC05.
- [16] DIEMER P J, LYLE C R, MEI Y C, *et al.* Organic thin-film transistors: Vibration-assisted crystallization improves organic/dielectric interface in organic thin-film transistors (Adv. Mater. 48/2013) [J]. *Advanced Materials*, 2013, 25(48): 7054.
- [17] SEKITANI T, ZSCHIESCHANG U, KLAUK H, *et al.* Flexible organic transistors and circuits with extreme bending stability [J]. *Nature Materials*, 2010, 9(12): 1015-1022.
- [18] PARK J S, MAENG W J, KIM H S, *et al.* Review of recent developments in amorphous oxide semiconductor thin-film transistor devices [J]. *Thin Solid Films*, 2012, 520(6): 1679-1693.
- [19] OU-YANG W, UEMURA T, MIYAKE K, *et al.* High-performance organic transistors with high-k dielectrics: A comparative study on solution-processed single crystals and vacuum-deposited polycrystalline films of 2,9-dicyl-dinaphtho [2,3-b,2',3'-f] thieno [3,2-b] thiophene [J]. *Applied Physics Letters*, 2012, 101(22): 223304.
- [20] KONDAIAH P, MADHAVI V, SEKHAR C M, *et al.* Structural, Electrical and Dielectric Properties of Sput-

- tered TiO₂ Films for Al/TiO₂/Si Capacitors [J]. *Science of Advanced Materials*, 2013, 5(4): 398-405.
- [21] SELVARAJ S K, JURSIK G, TAKOUDIS C G. Design and implementation of a novel portable atomic layer deposition/chemical vapor deposition hybrid reactor [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2013, 84(9): 095109.
- [22] ZHAO P, ITO A, GOTO T. Rapid deposition of YBCO films by laser CVD and effect of lattice mismatch on their epitaxial growth and critical temperature [J]. *Ceramics International*, 2013, 39(7): 7491-7497.
- [23] KROMKA A, BABCHENKO O, IZAK T, *et al.* Linear antenna microwave plasma CVD deposition of diamond films over large areas [J]. *Vacuum*, 2012, 86(6): 776-779.
- [24] KIM K M, KIM C W, HEO J S, *et al.* Competitive device performance of low-temperature and all-solution-processed metal-oxide thin-film transistors [J]. *Applied Physics Letters*, 2011, 99(24): 242109.
- [25] BAE E J, KANG Y H, HAN M, *et al.* Soluble oxide gate dielectrics prepared using the self-combustion reaction for high-performance thin-film transistors [J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2014, 2(28): 5695-5703.
- [26] GUO X H, DU K Q, GUO Q Z, *et al.* Effect of energy density on microstructure and properties of Al₂O₃ plasma electrolysis oxidation film [J]. *ECS Solid State Letters*, 2013, 2(7): S1-S4.
- [27] WATANABE H, HOSOI T, KIRINO T, *et al.* Synchrotron x-ray photoelectron spectroscopy study on thermally grown SiO₂/4H-SiC (0001) interface and its correlation with electrical properties [J]. *Applied Physics Letters*, 2011, 99(2): 021907.
- [28] CHENG Z G, ZHOU Q Y, WANG C X, *et al.* Toward intrinsic graphene surfaces: A systematic study on thermal annealing and wet-chemical treatment of SiO₂-supported graphene devices [J]. *Nano Letters*, 2011, 11(2): 767-771.
- [29] KIM Y H, HEO J S, KIM T H, *et al.* Flexible metal-oxide devices made by room-temperature photochemical activation of sol-gel films [J]. *Nature*, 2012, 489(7414): 128-132.
- [30] XIE Y T, CAI S C, SHI Q, *et al.* High performance organic thin film transistors using chemically modified bottom contacts and dielectric surfaces [J]. *Organic Electronics*, 2014, 15(9): 2073-2078.
- [31] JI C M, SUN Z H, ZHANG S Q, *et al.* N-Isopropylbenzylammonium tetrafluoroborate: An organic dielectric relaxor with a tunable transition between high and low dielectric states [J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2014, 2(3): 567-572.
- [32] VAKLEVN L, MÜLLER R, MUIR B V O, *et al.* High-performance flexible bottom-gate organic field-effect transistors with gravure printed thin organic dielectric [J]. *Advanced Materials Interfaces*, 2014, 1(3), doi: 10.1002/admi.201300123.
- [33] XU X L, CUI Q Y, JIN Y Z, *et al.* Low-voltage zinc oxide thin-film transistors with solution-processed channel and dielectric layers below 150 °C [J]. *Applied Physics Letters*, 2012, 101(22): 222114.
- [34] BANGERK K, PETERSON R L, MORI K, *et al.* High performance, low temperature solution-processed barium and strontium doped oxide thin film transistors [J]. *Chemistry of Materials*, 2014, 26(2): 1195-1203.
- [35] KIM M G, KANATZIDIS M G, Facchetti A, *et al.* Low-temperature fabrication of high-performance metal oxide thin-film electronics via combustion processing [J]. *Nature Materials*, 2011, 10(5): 382-388.
- [36] LEPPÄNIEMI J, OJANPERÄ K, KOLOLUOMA T, *et al.* Rapid low-temperature processing of metal-oxide thin film transistors with combined far ultraviolet and thermal annealing [J]. *Applied Physics Letters*, 2014, 105(11): 113514.

作者简介:王东平(1986—),男,山东潍坊人,博士研究生,主要从事薄膜晶体管材料与工艺等方面的研究。E-mail: hh-fong@sjtu.edu.cn