

氢元素对镓锌氧化物薄膜晶体管性能的影响

邵夔 丁士进

Effects of hydrogen impurities on performances and electrical reliabilities of indium-gallium-zinc oxide thin film transistors

Shao Yan Ding Shi-Jin

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 67, 098502 (2018) DOI: 10.7498/aps.67.20180074

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.20180074>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2018/V67/I9>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

石墨烯射频器件研究进展

Research progress of graphene radio frequency devices

物理学报.2017, 66(21): 218502 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.218502>

玉米淀粉固态电解质质子\电子杂化突触晶体管

Corn starch solid electrolyte gated proton/electron hybrid synaptic transistor

物理学报.2017, 66(16): 168501 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.168501>

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>

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>

综述

氢元素对铟镓锌氧化物薄膜晶体管性能的影响*

邵龔 丁士进†

(复旦大学微电子学院, 专用集成电路与系统国家重点实验室, 上海 200433)

(2018年1月10日收到; 2018年2月23日收到修改稿)

对国际上有关铟镓锌氧化物薄膜晶体管中氢元素的来源、存在形式、表征方法以及对器件性能的影响进行了综述. 氢元素是铟镓锌氧化物薄膜晶体管中最为常见的杂质元素, 能以正离子和负离子两种形式存在于薄膜晶体管的沟道中, 并对器件性能和电学可靠性产生影响. 对铟镓锌氧化物薄膜晶体管而言, 沟道中氢元素浓度越高, 其场效应迁移率越高、亚阈值摆幅越小、器件的电学稳定性也越好. 同时, 工艺处理温度过低或过高都不利于其器件性能的改善, 通常以 200—300 °C 为宜.

关键词: 铟镓锌氧化物, 薄膜晶体管, 氢元素杂质, 电学可靠性

PACS: 85.30.Tv, 81.20.-n, 77.55.-g

DOI: 10.7498/aps.67.20180074

1 引言

氧化物半导体材料的研究至今已有数十年的历史, 但其中一些物理现象的起源, 如缺陷能级和光诱导效应等, 直到现在仍未能达成共识. 在此背景下, 氢元素作为氧化物材料中最为常见的杂质元素开始受到越来越多的关注. 近年来相关的研究报道揭示了氧化物半导体材料中均含有相当数量的氢元素, 因此其物理特性很有可能受到氢元素的影响^[1-4]. 作为氧化物半导体之一, 铟镓锌氧化物(indium-gallium-zinc oxide, IGZO) 半导体薄膜材料具有迁移率高、制备工艺温度低、均匀性好、可见光穿透率高等优点, 被认为是下一代透明柔性显示器的主要沟道材料^[5]. 它同样含有大量的氢元素杂质, 并可能影响到器件的性能. 因此, 弄清楚氢元素在 IGZO 中的存在与影响不仅有助于加深对其材料特性的理解, 更可能推动下一代半导体显示技术的发展和應用.

自 Tsao 等^[6] 首次报道氢元素对 IGZO 薄膜晶体管(thin film transistor, TFT) 的阈值电压和亚

阈值摆幅特性的改善以来, 关于氢元素对 IGZO-TFT 特性的影响的研究不断涌现. 但是, 由于这些研究所采用的方法各不相同, 所得结果相差很大, 因此难以直接进行比较. 此外, 这些研究往往针对的是氢元素对某一单个器件特性的影响, 而对 IGZO-TFT 整体性能的影响报道很少. 因此, 本文综合相关的文献报道, 深入概括分析各研究之间的共性, 重点从 IGZO 中氢元素的来源、存在形式、表征方法及其对 TFT 性能和电学可靠性的影响等四个方面进行讨论. 同时以 IGZO-TFT 的迁移率、亚阈值摆幅和偏压稳定性作为主要性能参数进行阐述, 总结和归纳出氢元素对 IGZO-TFT 综合性能的影响, 并在分析现有研究局限性的基础上对未来发展做出了展望.

2 IGZO 薄膜中氢元素的来源

IGZO 薄膜通常是用磁控溅射的方式进行生长的. Miyase 等^[7] 对比了不同沉积压强条件下生长的 IGZO 薄膜的性质, 发现即使在高真空沉积条件(腔体基压为 10^{-7} Pa) 下, 薄膜中氢元素

* 国家自然科学基金(批准号: 61474027)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: sjding@fudan.edu.cn

杂质的浓度依旧保持在 10^{19} cm^{-3} 以上. 进一步分析研究显示, 随着 IGZO 薄膜的沉积速率由 3 nm/min 提高到 19 nm/min , 薄膜中氢元素的含量从 $5 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 逐渐降低到 10^{19} cm^{-3} , 表明氢元素杂质来自于沉积腔体中的残留气体, 并在薄膜沉积过程中参与了反应; 另一方面, 随着对 IGZO 靶材的预溅射功率从 70 W 提高到 150 W , IGZO 薄膜的氢元素含量从 $5 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 降低到 10^{19} cm^{-3} , 这说明靶材表面吸附的 H_2O 和 H_2 也是 IGZO 薄膜中氢元素的来源. 总之, 通过磁控溅射方式沉积的 IGZO 薄膜中会含有 10^{19} cm^{-3} 以上的氢元素 [8], 而这些氢元素主要是来自于沉积腔体中残留气体以及靶材表面吸附的 H_2O 和 H_2 等分子.

另一方面, 与 IGZO 层相邻材料薄膜中的氢元素也会影响沟道 IGZO 薄膜中氢元素的含量. Kim 等 [9] 研究了采用不同温度下原子层沉积 (atomic layer deposition, ALD) Al_2O_3 作为栅介质的 TFT 器件, 发现在 $150 \text{ }^\circ\text{C}$ 条件下生长的 Al_2O_3 薄膜中氢元素含量最高, 而在此薄膜上所沉积的 IGZO 沟道层中氢元素的含量也最高. 相似现象在其他文献中也有报道 [10–14]. Kulchaisit 等 [15] 使用羟基 (OH) 含量不同的硅氧烷作为器件的钝化层, 发现使用羟基含量较高的钝化层会导致器件的转移特性曲线中出现明显的驼峰现象, 并将其归因于氢元素由钝化层扩散进入 IGZO 沟道, 形成了寄生晶体管.

此外, 为了调节器件的性能也会主动引入氢元素杂质. 如在 IGZO 沟道沉积时通入 H_2 作为反应气体 [6,16], 对 IGZO 沟道进行氢等离子体处理 [17] 或深紫外线照射 [18], 在 H_2 或 H_2O 氛围中对器件进行后退火处理 [19–22] 或 KrF 激光退火 [23], 对器件进行氢元素等离子体处理 [24–28] 等. 这些工艺步骤均能有效地向 IGZO 沟道中引入氢元素.

综上所述, 氢元素是 IGZO-TFT 中沟道层 IGZO 中最为常见的杂质元素, 并主要来源于沉积腔体中气体残留和靶材吸附的分子、IGZO 沟道上下层薄膜中氢元素的扩散以及退火、掺杂等工艺的引入.

3 氢元素在 IGZO 薄膜中的存在形式

由于氢元素独特的原子结构, 它既可以失去电子形成正离子, 也可以得到电子形成负离子. 所以,

在 IGZO 薄膜中氢元素会以两种不同的形式存在, 即正离子 (H^+) 和负离子 (H^-) 的形式.

IGZO 薄膜中的氢元素会与薄膜中的 O^{2-} 离子结合而形成羟基, 并在此过程中释放出一个电子, 用反应方程式表示为: $\text{H}^0 + \text{O}^{2-} \rightarrow \text{OH}^- + \text{e}^-$ [29], 式中 H^0 表示的是氢原子, 而 OH^- 代表与金属相连的羟基, 其中羟基中的氢元素以正离子 H^+ 形式存在. Chen 等 [30] 分析了氢元素掺杂对 IGZO 能带的影响, 揭示了随着氢元素的引入, IGZO 沟道中的电子浓度提高, 相应的其费米能级也会升高 [31,32]. 所以掺杂氢元素的 IGZO 具有更高的费米能级, 与晶体管源漏电极所形成的势垒更低 (如图 1 所示), 因而更有利于电子的传导, 表现出来的器件的迁移率也就更高 [33,34].

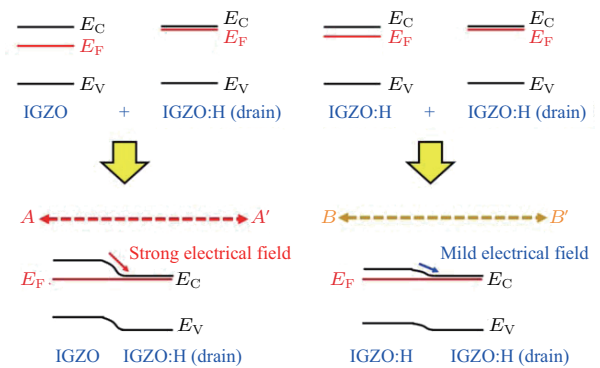


图 1 IGZO 与漏端区域能带示意图 [30]

Fig. 1. Energy-band at the region of the a-IGZO layer near the drain terminal [30].

负离子形式是氢元素杂质在 IGZO 薄膜中的另一种重要存在形式. 在这一情况下, 氢原子俘获电子形成 H^- 离子, 随后扩散到薄膜中 O 空位缺陷位置, 并与周围的金属离子成键, 形成 M—H 结构 [29]. 这一过程从晶体结构的角度来看, 是杂质氢原子占据了氧原子的位置, 所以形成了氢替位杂质. 用方程式表述如下: $\text{H}^0 + \text{e}^- + \text{V}_\text{O} \rightarrow \text{H}^- + \text{V}_\text{O} \rightarrow \text{H}_\text{O}$ [33], 式中 H^0 代表氢原子, V_O 表示氧空位缺陷, H_O 表示氢元素替位杂质. 图 2 是上述过程的能带结构变化示意图 [29]. 对于氧空位缺陷而言, 其能级位于 IGZO 价带顶上约 1.1 eV 的位置, 而 H^- 离子能级位于价带顶上约 0.4 eV 位置. 随着氢元素替位杂质的形成, IGZO 氧空位缺陷浓度降低, 缺陷能级到导带底的宽度也增大, 因此器件的负偏压稳定性以及负偏压光照稳定性都会提高 [35].

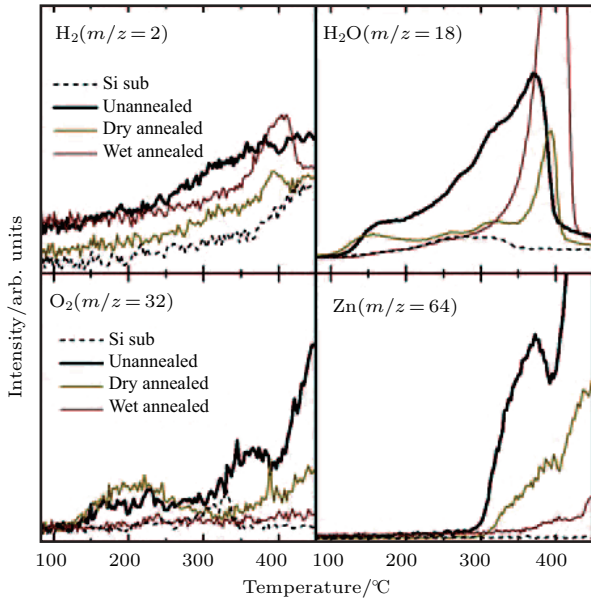


图4 不同退火条件下 a-IGZO 薄膜的 TDS 结果, 包括 H_2 ($m/z = 2$), H_2O ($m/z = 18$), O_2 ($m/z = 32$), Zn ($m/z = 64$) [44]

Fig. 4. TDS spectra of unannealed, the dry annealed, and the wet annealed a-IGZO films for H_2 ($m/z = 2$), H_2O ($m/z = 18$), O_2 ($m/z = 32$) and Zn ($m/z = 64$) [44].

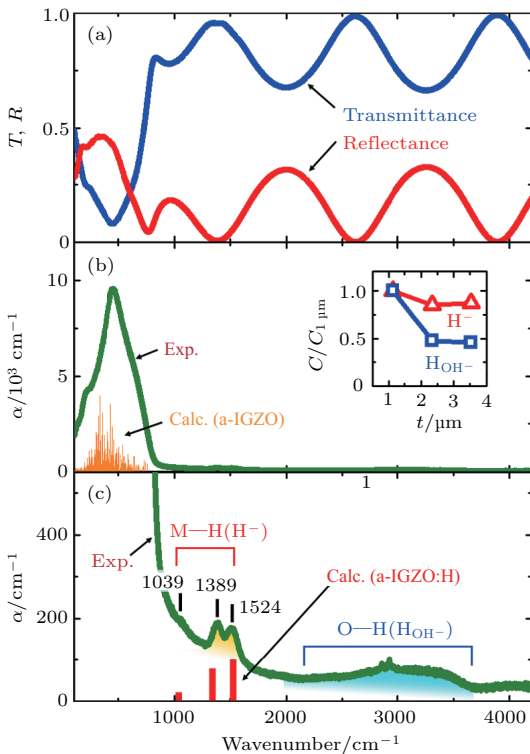


图5 (a) IGZO 薄膜红外透射与反射光谱; (b), (c) 为推导出的吸收系数 [29]

Fig. 5. (a) Infrared transmittance (T) and reflectance (R) spectra of a-IGZO thin film; (b) and (c) absorption coefficients calculated from the observed transmittance and reflectance spectra [29].

FTIR 测试是借助一束不同波长的红外线照射到样品上, 通过分析吸收光谱而获得样品的组成、结构和化学键信息, 是一种广泛应用的材料分析手段 [48]. Bang 等 [29] 在单晶 NaCl 衬底上沉积了 IGZO 薄膜, 再将 NaCl 晶体溶于水, 得到了 IGZO 单一薄膜. 然后借助红外吸收光谱分析证明了羟基和 M—H 结构同时存在, 如图 5 所示. 其中, 图 5 (c) 清楚地显示了样品的四个主要吸收峰, 分别为 1039, 1389 和 1524 cm^{-1} 处的三个尖峰和 3000 cm^{-1} 附近的宽峰. 其中最后一个宽峰对应于羟基的伸缩振动吸收 [40]; 而 1389 和 1524 cm^{-1} 两个吸收峰则被认为对应于 M—H 结构, 因为 IGZO 各金属元素的气态氢化物分子吸收峰位分别为 InH (1475 cm^{-1}), GaH (1604 cm^{-1}), ZnH (1616 cm^{-1}) [49].

5 氢元素对 IGZO-TFT 性能的影响与作用机制

氢元素对 IGZO-TFT 特性的影响主要体现在两个方面: 一方面是晶体管本身的性能, 如场效应迁移率 μ 、亚阈值摆幅 $S.S.$ 、阈值电压 V_{th} 、开关电流比 I_{on}/I_{off} 等; 另一方面则是晶体管的电学可靠性, 如正、负偏压稳定性. 表 1 列出了国际上有关氢元素对 IGZO-TFT 特性影响的报道. 其中, 研究的对象主要是利用退火掺杂工艺或上下层薄膜扩散方法引入了氢元素的 IGZO-TFT. 器件的工艺处理温度主要是选择在 150—300 $^{\circ}C$ 范围内, 也有部分新工艺或方法在室温下就可以进行. 此外, 多篇文献报道了通过向 IGZO 沟道引入氢元素而获得高于 40 $cm^2/V \cdot s$ 的优秀器件迁移率, 证明引入氢元素可以有效改善 IGZO-TFT 的性能.

氢元素的掺杂对 IGZO-TFT 的器件性能会产生直接的影响. Ahn 等 [28] 以热生长氧化硅为介质, 以磁控溅射的 IGZO 薄膜 (50 nm) 为沟道, 研制出了背栅 IGZO-TFT. 然后采用氢离子辐射的方法在室温条件下向 IGZO 沟道中掺入不同浓度的氢元素. 结果显示, 随着注入的氢离子浓度从 10^{14} ions/ cm^2 增加到 10^{16} ions/ cm^2 , 器件的场效迁移率从 0.16 $cm^2/(V \cdot s)$ 升高到 3.90 $cm^2/(V \cdot s)$, 亚阈值摆幅从 0.57 V/dec 降低到 0.35 V/dec. 分析表明, 器件性能的改善主要是由于注入的氢元素降低了 IGZO 沟道中的缺陷浓度.

表1 不同氢化方法对IGZO-TFT性能参数影响的比较
Table 1. Comparison of performance parameters of IGZO-TFT treated with various hydrogenation methods.

H元素来源	工艺处理温度/°C	TFT器件性能				文献
		$\mu/\text{cm}^2\cdot(\text{V}\cdot\text{s})^{-1}$	$S.S./\text{V}\cdot\text{dec}^{-1}$	V_{th}/V	$I_{\text{on}}/I_{\text{off}}$	
H ₂ 氛围沉积沟道	150	2.46	1.28	1.88	1.0×10^6	[6]
H ₂ 氛围沉积沟道		3.2	0.04	0.34	1.0×10^6	[16]
H ₂ 氛围退火	260	7.4	0.37	2.2	2.0×10^6	[20]
H ₂ 氛围退火	250	8	0.51	2.2	4.9×10^7	[21]
水蒸气氛围退火	300	12.3	0.6	7.8	1.0×10^8	[22]
H ₂ 等离子体处理	250	55.3	0.18	0.7	1.0×10^8	[17]
H ₂ 等离子体处理		7.27	0.49	0.96	1.2×10^7	[25]
N ₂ , H ₂ 等离子体处理	150	45.3	0.21	1.7	3.0×10^8	[27]
H ₂ 等离子体处理		3.9	0.36	0.31	1.0×10^6	[28]
高温热退火	700	11	0.32	-0.8	1.0×10^8	[50]
KrF激光退火		43.5		-9.9	1.0×10^8	[23]
深紫外线照射		60.2	0.25	2.7	1.0×10^7	[19]
硅氧烷钝化层扩散	300	9	0.2		1.0×10^6	[15]
氧化硅栅介质扩散	350	8.48	0.28	2.5	1.0×10^9	[10]
氧化硅栅介质扩散	150	8.8	0.42	4.2	1.0×10^6	[11]
氧化硅栅介质扩散		63.6	0.14	-0.10	9.3×10^7	[13]
氧化铝栅介质扩散	250	17.8	0.12	-0.75	1.0×10^8	[9, 12]
氧化铝栅介质扩散	400	17.5	0.17	3.24	9.6×10^{10}	[14]

氢元素的引入对IGZO-TFT的电学可靠性也同样会产生影响。Oh等^[21]制备了以等离子增强化学气相沉积(plasma enhanced chemical vapor deposition, PECVD) SiN_x为栅介质,以磁控溅射沉积IGZO为沟道的TFT,并研究了退火气氛(H₂或N₂)对器件可靠性的影响。结果显示,在栅极上施加20 V偏压应力2 h后,在H₂中退火的器件显示出更好的稳定性,其阈值电压漂移量为+0.27 V,而在N₂中退火的器件的阈值电压漂移达到+1.74 V。该结果表明,氢元素的存在可以有效地钝化SiN_x栅介质与IGZO沟道间的界面态,因而提高器件的正偏压稳定性。Zheng等^[13]比较了以400 °C PECVD和250 °C ALD SiO₂为栅介质的IGZO-TFT的性能,在经过任何后退火处理的条件下采用ALD SiO₂栅介质能得到更好的器件性能。此外,还发现使用ALD氧化硅栅介质的器件具有很好的负偏压稳定性,即在栅极上施加-15 V的电压应力1 h后其阈值电压漂移量仅为-0.03 V,

亚阈值摆幅几乎没有退化。然而,以PECVD SiO₂为栅介质的器件其阈值电压漂移高达-1.46 V,亚阈值摆幅增加220 mV/dec。进一步分析发现,使用ALD方法生长的SiO₂薄膜中含有更高浓度的氢元素。在磁控溅射沉积IGZO沟道层的过程中,这部分氢元素可能受离子轰击离开SiO₂层,继而扩散到IGZO薄膜中,从而钝化了其中的氧空位缺陷,提高了器件的负偏压稳定性。

需要指出的是,氢元素在IGZO薄膜中的存在与工艺处理温度有关。Hanyu等^[50]对基于热生长氧化硅介质和磁控溅射IGZO沟道的背栅TFT进行了氧气环境中退火处理研究。发现随着退火温度从100 °C升高到700 °C,IGZO-TFT的迁移率先升高后降低,亚阈值摆幅先减小后升高。当退火温度为200 °C时,器件的场效迁移率达到最大值11.0 cm²/(V·s),亚阈值摆幅达最小值0.32 V/dec。进一步分析表明,当退火温度小于200 °C时,TFT迁移率的提高以及亚阈值摆幅的减小主要是因为

沟道中深能级陷阱和浅施主能级密度的降低. 这里的浅施主能级是指以负离子形式存在的氢替位杂质 H_O . 在加热条件下 H_O 会发生分解, 反应式为: $\text{H}_\text{O} \rightarrow \text{H}^0 + \text{e}^- + \text{V}_\text{O}$ [51], 式中 H^0 代表氢原子, V_O 表示氧空位缺陷. 这一过程增加了沟道中载流子的浓度, 提高了器件的场效迁移率. 另一方面, 当退火温度高于 400°C 时, 氢元素向 IGZO 沟道外逸散而失去了对沟道的钝化作用, 导致沟道中产生新的缺陷, 因而降低了器件的场效迁移率, 并增大了器件的亚阈值摆幅. 因此, 工艺处理的温度既不能太低也不能太高, 以 $200\text{--}300^\circ\text{C}$ 为宜.

另外, Abliz 等 [27] 以热生长的 SiO_2 为栅介质, 磁控溅射的 IGZO 为沟道制作了 TFT, 并研究了 H_2 , N_2 或 $\text{N}_2\text{-H}_2$ 等不同成分以及 $0\text{--}300\text{ s}$ 不同时间等离子体处理对器件性能的影响. 结果显示, 经 $\text{N}_2\text{-H}_2$ 等离子体 200 s 处理的器件性能最佳. 同时该器件也表现出优秀的电学可靠性: 在 20 V 偏压应力作用 1 h 后, 阈值电压漂移 $+1.8\text{ V}$; 而在 -20 V 偏压应力作用 1 h 后, 阈值电压漂移 -1.6 V . 进一步分析表明, 其器件稳定性的提高主要是因为 $\text{N}_2\text{-H}_2$ 等离子体处理有效地降低了薄膜中氧空位浓度和 SiO_2/IGZO 界面态缺陷密度. 尽管从单个偏压稳定性角度而言结果并不突出, 但其通过氮、氢元素的同时引入实现了器件正负偏压稳定性的同时提高, 为后续 IGZO-TFT 电学可靠性的研究提供了新的思路.

6 总结与展望

综合以上所述, 氢元素是 IGZO-TFT 中最为常见的杂质元素, 它能以正离子和负离子两种形式存在于 IGZO 薄膜中, 并对 IGZO-TFT 的器件性能和电学可靠性产生影响. IGZO 沟道中氢元素浓度越高, 其迁移率越高, 亚阈值摆幅越小, 器件的电学可靠性也越好. 这是由于氢元素浓度越高, 它对沟道中氧空位缺陷和栅介质与沟道间的界面缺陷的钝化效果越好; 相反, 如果工艺处理温度过低或过高则不利于 IGZO-TFT 性能的改善, 通常以 $200\text{--}300^\circ\text{C}$ 为宜. 此外, 向 IGZO-TFT 的沟道适当引入氮元素也会有助于其电学可靠性的改善. 但需要指出的是, 针对 IGZO-TFT 中氢元素的研究尚不够深入, 还需要从以下三个角度进一步的探索.

第一, 沟道中氢元素的量化分析. 目前氢元素

对 IGZO-TFT 的影响主要通过分析经特定工艺处理之后器件获得的, 而缺少对氢元素含量的精确分析, 这就导致不同研究之间难以进行分析比对, 所得结果也不具有普适性. 因此, 深入的量化分析不仅可以加深我们对氢元素影响的理解, 也有助于提高研究成果的可复制性.

第二, 精确控制氢元素的含量分布. IGZO 薄膜中氢元素的含量与分布特征将直接影响到薄膜以及晶体管的各项性能. 然而, 当前的研究表明, IGZO 薄膜中的氢元素会在加热条件下发生扩散乃至脱离, 因此其含量与分布很大程度上会受到工艺处理温度的影响. 为了有效调控 IGZO 沟道中氢元素的影响, 除了在量化分析的基础上定量地掺杂外, 也需要尽可能地降低器件的工艺处理温度.

第三, 结合氮元素处理, 改善器件的电学可靠性. 氢元素对器件正、负偏压稳定性的单一方面改善效果明显, 但对另一方面作用效果一般; 而氮、氢元素结合处理可以同时改善这两方面的稳定性, 但处理效果还有待进一步提高. 因此从这一角度出发, 进一步改善 IGZO-TFT 的电学可靠性, 将有助于推动其应用发展.

参考文献

- [1] van de Walle C G 2000 *Phys. Rev. Lett.* **85** 1012
- [2] Hofmann D M, Hofstaetter A, Leiter F, Zhou H, Hennecker F, Meyer B K, Orlinskii S B, Schmidt J, Baranov P G 2002 *Phys. Rev. Lett.* **88** 45504
- [3] van de Walle C G, Neugebauer J 2003 *Nature* **423** 626
- [4] Du M H, M H, Biswas K 2011 *Phys. Rev. Lett.* **106** 115502
- [5] Nomura K, Ohta H, Takagi A, Kamiya T, Hirano M, Hosono H 2004 *Nature* **432** 488
- [6] Tsao S W, Chang T C, Huang S Y, Chen M C, Chen S C, Tsai C T, Kuo Y J, Chen Y C, Wu W C 2010 *Solid State Electron.* **54** 1497
- [7] Miyase T, Watanabe K, Sakaguchi I, Ohashi N, Domen K, Nomura K, Hiramatsu H, Kumomi H, Hosono H, Kamiya T 2014 *ECS J. Solid State SC.* **3** Q3085
- [8] Tang H, Ishikawa K, Ide K, Hiramatsu H, Ueda S, Ohashi N, Kumomi H, Hosono H, Kamiya T 2015 *J. Appl. Phys.* **118** 205703
- [9] Kim T, Nam Y, Hur J, Park S H, Jeon S 2016 *IEEE Electr. Dev. Lett.* **37** 1131
- [10] Hino A, Morita S, Yasuno S, Kishi T, Hayashi K, Kugimiya T 2012 *J. Appl. Phys.* **2** 114515
- [11] Tari A, Lee C H, Wong W S 2015 *Appl. Phys. Lett.* **107** 023501

- [12] Nam Y, Kim H O, Cho S H, Hwang C S, Kim T, Jeon S, Park S H 2016 *J. Inform. Display* **17** 65
- [13] Zheng L L, Ma Q, Wang Y H, Liu W J, Ding S J, Zhang D W 2016 *IEEE Electr. Dev. Lett.* **37** 743
- [14] Kim E, Kim C K, Lee M K, Bang T, Choi Y K, Park S H, Choi K C 2016 *Appl. Phys. Lett.* **108** 182104
- [15] Kulchaisit C, Ishikawa Y, Fujii M N, Yamazaki H, Bermundo J P S, Ishikawa S, Miyasako T, Katsui H, Tanaka K, Hamada K, Horita M, Uraoka Y 2016 *J. Display Technol.* **12** 263
- [16] Jung C H, Kim D J, Kang Y K, Yoon D H 2009 *Thin Solid Films* **517** 4078
- [17] Abliz A, Wang J L, Xu L, Wan D, Liao L, Ye C, Liu C S, Jiang C Z, Chen H P, Guo T L 2016 *Appl. Phys. Lett.* **108** 213501
- [18] Jeong S K, Kim M H, Lee S Y, Seo H, Choi D K 2014 *Nanoscale Res. Lett.* **9** 619
- [19] Kim H J, Park S Y, Jung H Y, Son B G, Lee C K, Lee C K, Jeong J H, Mo Y G, Son K S, Ryu M K, Lee S, Jeong J K 2013 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **46** 055104
- [20] Oh S I, Choi G, Hwang H, Lu W, Jang J H 2013 *IEEE Trans. Electron Dev.* **60** 2537
- [21] Oh S I, Woo J M, Jang J H 2016 *IEEE Trans. Electron Dev.* **63** 1910
- [22] Fujii M N, Ishikawa Y, Horita M, Uraoka Y 2014 *ECS J. Solid State SC.* **3** Q3050
- [23] Bermundo J P S, Ishikawa Y, Fujii M N, Ikenoue H, Uraoka Y 2017 *Appl. Phys. Lett.* **110** 133503
- [24] Kim J, Bang S, Lee S, Shin S, Park J 2012 *J. Mater. Res.* **27** 2318
- [25] Ahn B D, Shin H S, Kim H J, Park J S 2008 *Appl. Phys. Lett.* **93** 203506
- [26] Kim M H, Choi M J, Kimura K, Kobayashi H, Choi D K 2016 *Solid State Electron.* **126** 87
- [27] Abliz A, Gao Q, Wan D, Liu X Q, Xu L, Liu C S, Jiang C Z, Li X F, Chen H P, Guo T L, Li J C, Liao L 2017 *ACS Appl. Mater. Inter.* **9** 10798
- [28] Ahn B D, Park J S, Chung K B 2014 *Appl. Phys. Lett.* **105** 163505
- [29] Bang J, Matsuishi S, Hosono H 2017 *Appl. Phys. Lett.* **110** 232105
- [30] Chen G F, Chang T C, Chen H M, Chen B W, Chen H C, Li C Y, Tai Y H, Hung Y J, Cheng K C, Huang C S, Chen K K, Lu H H, Lin Y H 2017 *IEEE Electr. Dev. Lett.* **38** 334
- [31] Chen C, Cheng K C, Chagarov E, Kanicki J 2011 *Jpn. J. Appl. Phys.* **50** 091102
- [32] Hwang E S, Kim J S, Jeon S M, Lee S J, Jang Y J, Cho D Y, Hwang C S 2018 *Nanotechnology* **29** 155203
- [33] Nakashima M, Oota M, Ishihara N, Nonaka Y, Hirohashi T, Takahashi M, Yamazaki S, Obonai T, Hosaka Y, Koezuka J 2014 *J. Appl. Phys.* **116** 213703
- [34] Li Y J, Liu Z L, Jiang K, Hu X F 2013 *J. Non-Cryst. Solids* **378** 50
- [35] Sallis S, Butler B T, Quackenbush N F, Williams D S, Junda M, Fischer D A, Woicik J C, Podraza N J, White B E, Walsh A, Piper L F J 2014 *Appl. Phys. Lett.* **104** 232108
- [36] Nguyen T T T, Aventurier B, Renault O, Terlier T, Barnes J P, Templier F 2014 *21st International Workshop on Active-Matrix Flatpanel Displays and Devices—TFT Technologies and FPD Materials (AM-FPD)* Ryukoku Univ. Kyoto, Japan, July 2–4, 2014 p149
- [37] Hina A, Takanashi Y, Tao H, Morita S, Ochi M, Goto H, Hayashi K, Kugimiya T 2014 *J. Vac. Sci. Technol. B* **32** 031210
- [38] Nguyen T T T, Aventurier B, Terlier T, Barnes J P, Templier F 2017 *J. Display Technol.* **11** 554
- [39] Chang Y H, Yu M J, Lin R P, Hsu C P, Hou T H 2016 *Appl. Phys. Lett.* **108** 033502
- [40] Nomura K, Kamiya T, Hosono H 2013 *ECS J. Solid State SC.* **2** P5
- [41] Ide K, Kikuchi Y, Nomura K, Kimura M, Kamiya T, Hosono H 2011 *Appl. Phys. Lett.* **99** 093507
- [42] Hanyu Y, Abe K, Domen K, Nomura K, Hiramatsu H, Kumomi H, Hosono H, Kamiya T 2014 *J. Display Technol.* **10** 979
- [43] Domen K, Miyase T, Abe K, Hosono H, Kamiya T 2014 *J. Display Technol.* **10** 975
- [44] Nomura K, Kamiya T, Ohta H, Hirano M, Hosono H 2008 *Appl. Phys. Lett.* **93** 192107
- [45] Ochi M, Hino A, Goto H, Hayashi K, Kugimiya T 2017 *ECS J. Solid State SC.* **6** 247
- [46] Jeon J K, Um J G, Lee S, Jang J 2017 *AIP Adv.* **7** 125110
- [47] Lu Y F, Ni H Q, Mai Z H, Ren Z M 2000 *J. Appl. Phys.* **88** 498
- [48] Lavrov E V 2003 *Physica B* **340–342** 195
- [49] Aldridge S, Downs A J 2001 *Chem. Rev.* **101** 3305
- [50] Hanyu Y, Domen K, Nomura K, Hiramatsu H, Kumomi H, Hosono H, Kamiya T 2013 *Appl. Phys. Lett.* **103** 202114
- [51] Noh H K, Park J S, Chang K J 2013 *J. Appl. Phys.* **113** 063712

REVIEW

Effects of hydrogen impurities on performances and electrical reliabilities of indium-gallium-zinc oxide thin film transistors*

Shao Yan Ding Shi-Jin[†]*(State Key Laboratory of ASIC and System, School of Microelectronics, Fudan University, Shanghai 200433, China)*

(Received 10 January 2018; revised manuscript received 23 February 2018)

Abstract

The influences of hydrogen impurities on the performances of indium-gallium-zinc oxide (IGZO) thin film transistors (TFT) are summarized in this article. Firstly, the sources of hydrogen impurities in the IGZO channels of the TFTs are proposed, which could originate from the residual gas in the deposition chamber, the molecules absorbed on the sputtering target surface, the neighbor films that contain abundant hydrogen elements, doping during annealing processes, etc. The hydrogen impurities in the IGZO films can exist in the forms of hydroxyl groups and metal hydride bonds, respectively. The former originates from the reaction between H atoms and the O^{2-} ions. This reaction releases free electrons, leading to a rise of the Fermi level of IGZO, and thus enhancing the mobilities of IGZO TFTs. The latter incurs negative charges on H atoms, and thus changing the distribution of the subgap density of states, hence improving the negative bias (or illumination) stabilities of IGZO TFTs. Subsequently, various methods are also proposed to characterize hydrogen elements in IGZO, such as secondary ion mass spectroscopy, thermal desorption spectroscopy, X-ray photoelectron spectroscopy and Fourier transform infrared spectroscopy. Finally, the effects of hydrogen impurities on the electrical characteristics of the IGZO TFTs, such as the field effect mobilities, subthreshold swings, threshold voltages, on/off current ratios as well as the positive and negative bias stress stabilities, are discussed. The results indicate that hydrogen element concentration and process temperature are two key factors for the device performances. With the increase of hydrogen element concentration in the IGZO channels, the TFTs exhibit higher electron mobilities, lower subthreshold swings and better reliabilities. However, annealing at too high or low temperatures cannot improve the device performance, and the most effective annealing temperature is 200–300 °C. It is anticipated that this review could be helpful to the IGZO TFT researchers in improving the device performances and understanding the underlying mechanism.

Keywords: indium-gallium-zinc oxide, thin film transistor, hydrogen impurity, electrical stability**PACS:** 85.30.Tv, 81.20.-n, 77.55.-g**DOI:** 10.7498/aps.67.20180074

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61474027).

[†] Corresponding author. E-mail: sjding@fudan.edu.cn