

低温快速制备基于溶液工艺的高性能 氧化铟薄膜及晶体管*

张雪^{1)†} Kim Bokyoung²⁾ Lee Hyeonju²⁾ Park Jaehoon^{2)‡}

1) (山东科技大学海洋科学与工程学院, 青岛 266590)

2) (翰林大学电子工程专业, 春川 24252)

(2024 年 1 月 11 日收到; 2024 年 2 月 27 日收到修改稿)

利用脉冲紫外线辅助热退火在 200 °C 的低温条件下, 5 min 内制备了基于溶液工艺的氧化铟薄膜及薄膜晶体管. 对比传统热退火, 研究了脉冲紫外线辅助热退火对氧化铟薄膜的表面形态、化学结构和电学特性的影响. 实验结果表明, 脉冲紫外线辅助热退火方式能够在短时间内实现改善氧化铟薄膜的质量及薄膜晶体管的性能. 原子力显微镜和场发射扫描电子显微镜结果显示该薄膜表面较传统热退火制备薄膜表面更为致密平坦. X 射线光电能谱测试表明, 脉冲紫外线辅助热退火处理后会产​​生氧空位, 从而提高载流子浓度, 改善了氧化铟薄膜的导电性. 此外, 对比研究了紫外线辅助热退火对氧化铟薄膜晶体管电气性能的影响. 结果表明器件的电学特性得到了明显改善, 亚阈值摆幅降低至 0.12 mV/dec, 阈值电压为 7.4 V, 电流开关比高达 1.29×10^7 , 场效应迁移率提升至 $1.27 \text{ cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$. 因此, 脉冲紫外线辅助热退火是一种简单、快速的退火方式, 即使在低温条件下也能快速提高氧化铟薄膜和薄膜晶体管的性能.

关键词: 脉冲紫外线辅助热退火, 氧化铟, 溶液法, 薄膜晶体管

PACS: 68.55.-a, 82.50.Hp

DOI: 10.7498/aps.73.20240082

1 引言

基于金属氧化物半导体材料的薄膜晶体管 (thin film transistors, TFTs) 在过去几十年中, 凭借其优异的电气性能、良好的稳定性以及可低温制备等特点, 在气体传感器、平板显示器和柔性电子等新一代电子产品领域具有广阔的应用前景^[1-3].

在金属氧化物半导体材料的诸多制备工艺中, 溶液法具有成本低、大面积沉积能力强、设备简单等优点而得到了广泛研究^[4,5]. 然而根据相关报道, 就基于溶液法制备的金属氧化物半导体材料仍面临两方面挑战. 首先, 形成高质量金属氧化物薄膜

所需的高温退火工艺, 被认为是在柔性基底上进行应用的主要障碍^[6,7]; 其次, 基于溶液法的“先沉积、后成核与生长”的成膜过程, 多数金属氧化物薄膜存在成膜质量和电气性能较差等问题^[8-10]. 因此, 如何以溶液法在低温制备高性能、高质量的金属氧化物和 TFT 一直是近年来的研究热点.

在不牺牲材料及器件性能的前提下, 人们一直在努力通过光源退火、微波退火、高压退火和激光退火等方法制备金属氧化物 TFT^[11-14]. 如在谢应涛等^[11]在以 2 kW 的紫外/红外双光源退火溶液法氧化铟薄膜的研究中, 薄膜样品的成膜质量及性能可媲美较传统 450 °C 高温热退火工艺的样品, 但所需的处理时间较长. 而激光退火工艺处理

* 科技部中韩青年科学家交流计划 (批准号: 国科外 [2021]5 号) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: skd996027@sdust.edu.cn

‡ 通信作者. E-mail: jaypark@hallym.ac.kr

时间较短, 如 Huang 等^[15]在以激光退火工艺制备 InGaZnO TFT 的研究中, 可通过激光照射薄膜引起内部氧空位增加, 在 250 μs 内使器件的载流子迁移率由 12.4 $\text{cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$ 提升至 17.8 $\text{cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$. 但此方法不仅所使用的设备较为复杂, 且需要调控的工艺参数较多, 导致薄膜的制备成本和性能调控受到限制. 而脉冲紫外线辅助热退火法 (pulsed UV assisted thermal annealing method) 是一种比较先进的半导体成膜技术, 基本结构主要由加热板、惰性气体灯和动力系统三部分组成, 通过动力系统向惰性气体灯提供能量, 继而以脉冲形式激发紫外线. 从惰性气体灯发射的脉冲光可以将热量集中在基板或材料表面上, 使得与传统的高温热源相比, 对下面的薄膜或基板的影响较小; 而与前述激光退火和光源退火等方法相比, 脉冲紫外线辅助热退火工艺具有设备简单、功耗低, 且在低温条件下短时间内便可达到快速提高金属氧化物薄膜和器件性能的目的^[16-18].

本研究使用氙闪灯进行脉冲紫外辅助热退火制备高质量金属氧化物薄膜. 基于溶液工艺, 以硝酸盐前驱体溶液制备了氧化铟 (indium oxide, In_2O_3) 半导体. 为了解 In_2O_3 前驱体溶液的热分解过程、半导体薄膜的形态及结构特征, 分别进行热重分析 (thermogravimetric analysis, TGA)、X 射线衍射 (X-ray diffraction, XRD)、原子力显微镜 (atomic force microscopy, AFM)、场发射扫描电子显微镜 (field emission scanning electron microscope, FESEM)、X 射线光电能谱 (X-ray photoelectron spectroscopy, XPS) 测试. 最后, 为了解 In_2O_3 薄膜和 In_2O_3 TFT 的电学特性, 分别进行霍尔效应测试和输出与转移特性的分析.

2 实验过程

2.1 前驱体溶液的配制

将硝酸铟水合物 ($\text{In}(\text{NO}_3)_3 \cdot x\text{H}_2\text{O}$, Sigma-Aldrich) 溶解于 2-甲氧基乙醇 (2-ME, Sigma-Aldrich) 溶剂中制备 0.2 mol/L 的 In_2O_3 前驱体溶液. 然后将前驱体溶液放置在 75 $^\circ\text{C}$ 的热板上, 以 350 r/min 的速度搅拌 5 h, 获得均匀的 In_2O_3 溶液.

2.2 In_2O_3 薄膜及 In_2O_3 TFT 的制备

如图 1(a) 所示, 实验制备了底栅顶接触结构

的 In_2O_3 TFT. In_2O_3 前驱体溶液被旋涂在带有 100 nm 厚氮化硅 (SiN_x) 电介质层的硅板上. 在旋涂前, 将 SiN_x/Si 基板分别用丙酮、异丙醇和去离子水进行 15 min, 30 min 和 1 h 的超声清洗, 放入 180 $^\circ\text{C}$ 的烘箱中加热 1 h. 为进一步去除基板表面残余的有机杂质, 同时增加基板的亲水性, 将基板置于等离子体处理设备中, 通入氧气并在 40 W, 20 sccm (1sccm = 1 mL/min) 条件下清洗 1 min. 将配置好的 In_2O_3 前驱体溶液用 0.2 μm 的 PTFE 过滤器过滤后滴在基板表面, 采用旋涂法以 5000 r/min 的速度旋涂 35 s. 随后将其置于 80 $^\circ\text{C}$ 的热板上加热 5 min 进行预烘干. 薄膜固化过程分别采用传统热退火 (thermal annealing, T.A.) 和脉冲紫外线辅助热退火 (pulsed UV assisted thermal annealing, pulsed UV + T.A.) 两种方式进行, 分别记作样品 1、样品 2 和样品 3. 传统热退火方式 (样品 1) 采用马弗炉进行热退火处理, 即将预烘干后的基板置于 300 $^\circ\text{C}$ 的马弗炉中加热 30 min; 如图 1(b), 脉冲紫外线辅助热退火方式采用氙灯作为脉冲紫外线的来源, 将预烘干后的基板置于距离氙灯 10 cm 的 200 $^\circ\text{C}$ 热板上, 分别进行 5 min (样品 2) 和 10 min (样品 3) 的脉冲紫外线照射 (设备功率为 500 W, 频率为 15 Hz). 最后, 在真空热蒸镀系统中通过掩模版在 In_2O_3 薄膜上制备 TFT 的铝源 (Al) 金属电极. 沟道的长度 (L) 和宽度 (W) 分别为 80 和 2000 μm .

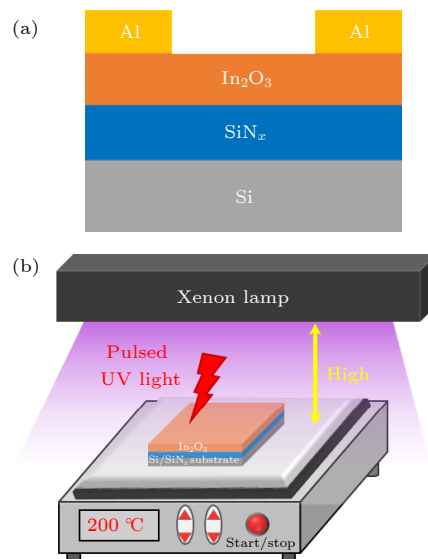


图 1 (a) In_2O_3 TFT 的结构示意图; (b) 脉冲紫外线辅助热退火工艺的原理示意图

Fig. 1. Schematic diagram of (a) structure of the prepared In_2O_3 TFT and (b) principle of the pulsed UV-assisted T.A.

3 结果与讨论

图2显示了实验中所制备的 In_2O_3 前驱体溶液的 TGA 测试结果. 从图2可以看出 In_2O_3 前驱体溶液的热分解过程主要分为两个阶段. 第1阶段是从室温到 100 $^{\circ}\text{C}$, 质量损失约为 95%, 这主要是由于溶剂的蒸发以及有机化合物的分解, 使 $\text{In}(\text{NO}_3)_3 \cdot x\text{H}_2\text{O}$ 溶液分解并水解为 $\text{In}(\text{OH})_3$. 第2阶段是从 100—300 $^{\circ}\text{C}$, 可以观察到重量在以非常缓慢的速度继续下降, 这是由于 $\text{In}(\text{OH})_3$ 脱羟基形成 In_2O_3 引起的. 而当温度持续升高到 300 $^{\circ}\text{C}$ 以上时, 重量损失可以忽略不计, 表明 In_2O_3 前驱体溶液基本已完成热分解过程, 形成 In_2O_3 薄膜.

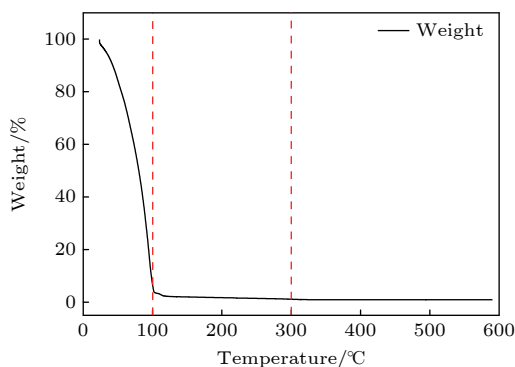


图2 In_2O_3 前驱体溶液的 TGA 曲线
Fig. 2. TGA of In_2O_3 precursor solution.

为了对比传统热退火脉冲紫外线辅助热退火工艺对 In_2O_3 薄膜性能的影响, 分别以样品 1 和样品 2 为例进行了相关分析. 图3显示了沉积在 Si 基板上, 以传统热退火和脉冲紫外线辅助热退火制

备的样品 1 和样品 2 的 XRD 图谱. 从图3可看出, 样品 1 和样品 2 在 50 $^{\circ}$ —60 $^{\circ}$ 之间均出现与 Si(100) 衬底一致的衍射峰^[19]. 此外, 在约 30.8 $^{\circ}$ 处观察到的衍射峰与 In_2O_3 的 (222) 面重合, 这表明通过这两种方法制备的样品已经形成了 In_2O_3 薄膜^[20,21]. 此外, 比较样品 1 和样品 2 可以看出, 衍射峰的位置并没有发生显著变化, 但样品 1 中 (222) 衍射峰的强度略大于样品 2 中 (222) 衍射峰强度, 这是由于基于脉冲紫外线辅助热退火制备样品 2 的过程中温度较低且时间较短导致的. 由此可知, 脉冲紫外线具有促进低温条件下的金属氧化物前驱体溶液快速结晶的效果.

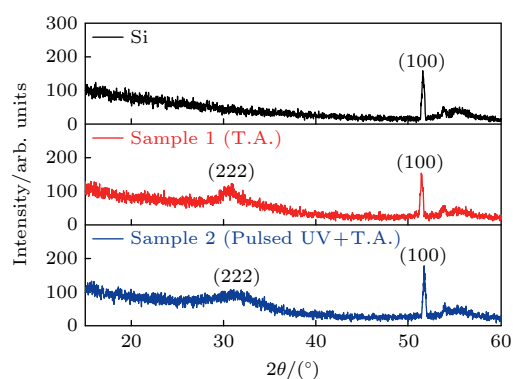


图3 硅板、样品 1 (传统热退火方式) 和样品 2 (脉冲紫外线辅助热退火方式) 的 XRD 图谱
Fig. 3. XRD patterns of Si substrate, Sample 1 (T.A.) and Sample 2 (pulsed UV+T.A.).

图4和图5分别显示了样品 1 和样品 2 的 AFM 和 FESEM 形貌图. 在图4(a), (b) 的 AFM 结果中, 可以观察到样品 2 的薄膜表面更为光滑平坦. 经测量得到样品 1 的表面均方根粗糙度约为 297 nm,

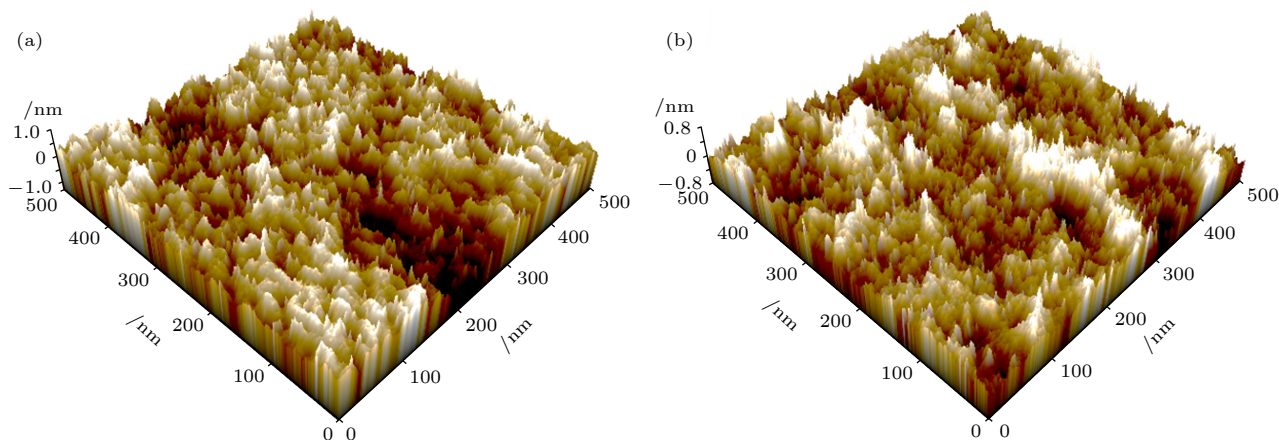


图4 In_2O_3 薄膜的 AFM 图像 (a) 样品 1 (传统热退火方式); (b) 样品 2 (脉冲紫外线辅助热退火方式)
Fig. 4. AFM images of In_2O_3 thin films: (a) Sample 1 (T.A.); (b) Sample 2 (pulsed UV+T.A.).

而样品 2 的薄膜表面均方根粗糙度则降低至 224 pm. 这表明通过脉冲紫外线辅助热退火方法可改善 In_2O_3 薄膜的表面形态及均方根粗糙度, 达到提升 In_2O_3 薄膜性能的作用, 获得表面更光滑平坦的半导体薄膜. 在图 5(a), (b) 的 FESEM 结果中, 样品 1 和样品 2 的薄膜厚度分别约为 22 和 17 nm.

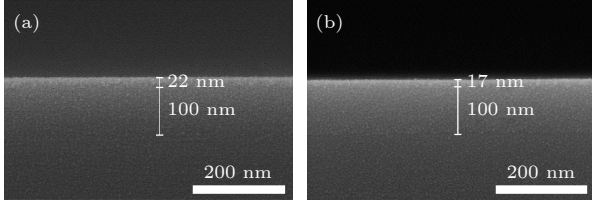


图 5 In_2O_3 薄膜的 FESEM 图像 (a) 样品 1 (传统热退火方式); (b) 样品 2 (脉冲紫外线辅助热退火方式)

Fig. 5. FESEM images of In_2O_3 thin films: (a) Sample 1 (T.A.); (b) Sample 2 (pulsed UV+T.A.).

为探究不同热退火方式所制备的 In_2O_3 薄膜的化学性质, 采用了 XPS 分别对样品 1 和样品 2 表面的化学和电子结构进行测量. 图 5 和图 6 分别显示了样品 1 和样品 2 的 In 3d 和 O 1s 轨道能谱. 如图 6 所示, 样品 1 (444.58 和 452.08 eV) 和样品 2 (443.98 和 451.68 eV) 的图谱中均显示出两个特征峰, 分别是轨道 $3d_{5/2}$ 和 $3d_{3/2}$, 表明了样品中 In 的化学态为 +3, 并与 In_2O_3 晶格中的 O 结合 [22,23].

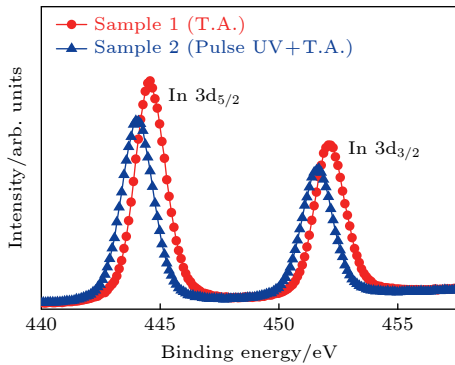


图 6 样品 1 (传统热退火方式) 和样品 2 (脉冲紫外线辅助热退火方式) 的 In 3d XPS 图谱

Fig. 6. In 3d XPS spectra of Sample 1 (T.A.) and Sample 2 (pulsed UV+T.A.).

进一步对样品 1 和样品 2 薄膜表面的 O 1s 进行高斯分峰拟合处理, 结果分别显示在图 7(a), (b). 其中, O 1s 图谱可以拟合成 O_I , O_II 和 O_III 的 3 个峰, 分别对应的是晶格氧 (O—M)、氧空位 (O—V) 和吸附氧 (O—A). 为了对比样品 1 和样品 2 内部

各类氧含量的变化, 分别对 O 1s 图谱中 O_I , O_II 和 O_III 的峰位占比进行了计算. 如图 7(a), (b) 所示, 样品 1 中 3 峰的占比分别为 64.7%, 28.8% 和 6.5%, 样品 2 中 3 峰的占比分别为 62.7%, 34.3% 和 3%. 对比传统热退火方式制备的样品 1, 以脉冲紫外线辅助热退火方式制备的样品 2 的晶格氧与吸附氧含量均有一定程度的降低, 而氧空位的含量增加至 34.3%. 表明氧空位的增加主要是通过断裂材料中 O—M 化学键, 即将晶格氧转换为氧空位, 以及降低薄膜表面的吸附氧所导致的.

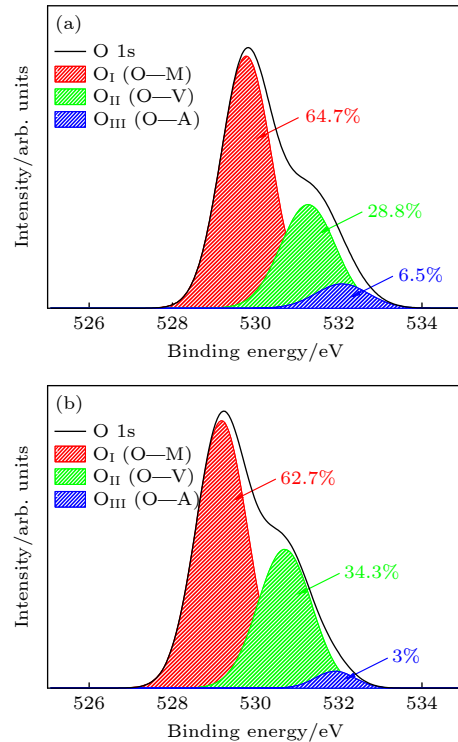
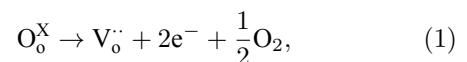


图 7 In_2O_3 薄膜 O 1s 的拟合 XPS 图谱 (a) 样品 1 (传统热退火方式); (b) 样品 2 (脉冲紫外线辅助热退火方式)

Fig. 7. O 1s high resolution XPS spectra of In_2O_3 thin film: (a) Sample 1 (T.A.); (b) Sample 2 (pulsed UV+T.A.).

脉冲紫外线辅助热退火工艺将光能与热能同时作用于 In_2O_3 薄膜, 促使低温条件下 In_2O_3 薄膜表面的吸附氧 (O—A) 与内部的晶格氧 (O—M) 化学键快速发生断裂形成氧空位. 如图 8 所示, 其中 O—A 化学键获得充分能量而断裂后, 薄膜表面所吸附的部分杂质会在此过程中被去除; O—M 化学键获得充分能量而断裂后如 (1) 式 [24] 所示, 会产生氧空位和自由电子, 并排出 O_2 .



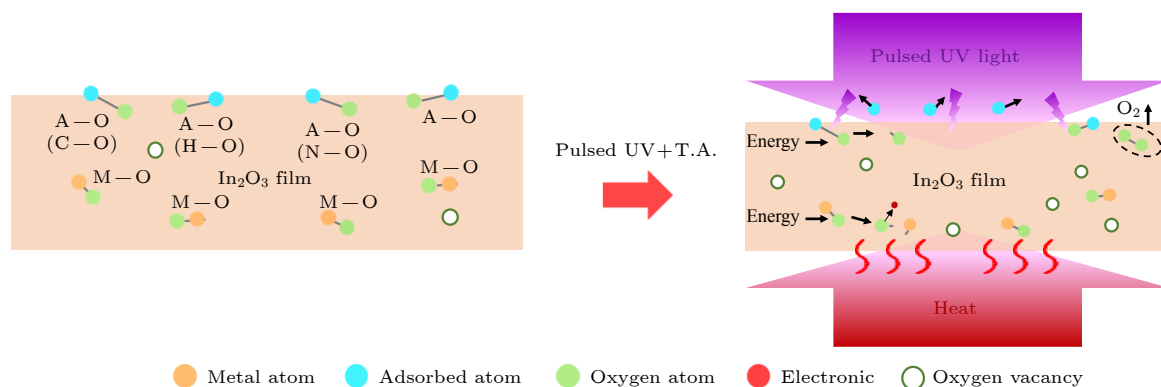
图 8 脉冲紫外线辅助热退火促使 In_2O_3 薄膜内部氧空位生成机理

Fig. 8. Pulsed UV-assisted thermal annealing promotes the mechanism of oxygen vacancy generation inside In_2O_3 thin films.

其中, $\text{O}_\text{o}^\times$ 代表晶格中的氧原子, $\text{V}_\text{o}^\bullet$ 代表带正电荷的氧空位, e^- 代表电子. 因此, 在金属氧化物材料中的氧空位是载流子的主要来源^[25,26], 样品 2 中氧空位的含量增加意味着薄膜中的载流子浓度会有一定的增多.

值得注意的是, 如图 6 和图 7 所示, 对比样品 1 中的 In 3d 和 O 1s 图谱, 样品 2 图谱中的各峰均向较低的结合能处转移. 相似的现象同样发生在 Tsay 和 Liang^[27] 基于溶液工艺的 p 型镓锡氧化物 (GTO) 的研究中. 即对比传统热退火, 实验中采用紫外线辅助热退火的 GTO 薄膜的 XPS 图谱, 紫外线辅助热退火样品的 Sn 3d 和 O 1s 各峰也存在向低结合能处移动的现象. 由此说明, 脉冲紫外线辅助热退火方式对比传统热退火方式, 可以在低温条件下短时间内可为原子的扩散提供更多动能, 且可以改变金属氧化物薄膜的化学性质.

为了对比传统热退火和脉冲紫外线辅助热退火工艺对 In_2O_3 薄膜电气特性的影响, 分别对两种退火方法所制备的样品 1、样品 2 和样品 3 进行了霍尔效应测试 (数据结果均为多个相同条件所制样品数据的平均值). 结果如图 9 所示, In_2O_3 薄膜的载流子浓度与霍尔迁移率均呈上升趋势, 即对比传统热退火方式, 脉冲紫外线辅助热退火方式可提高 In_2O_3 薄膜内的载流子浓度和霍尔迁移率, 并且随着处理时间的延长呈大幅增长趋势. 由于薄膜的电阻率和霍尔迁移率成反比, 因此样品 1 与样品 2、样品 3 的霍尔迁移率和电阻率的变化趋势相反. 结合 XPS 的数据结果, 脉冲紫外线照射能有效提高 In_2O_3 薄膜中氧空位的含量. 因此对比样品 1, 样品 2 和样品 3 中薄膜的电阻率大大降低, 且载流子浓度和霍尔迁移率得到了有效提升.

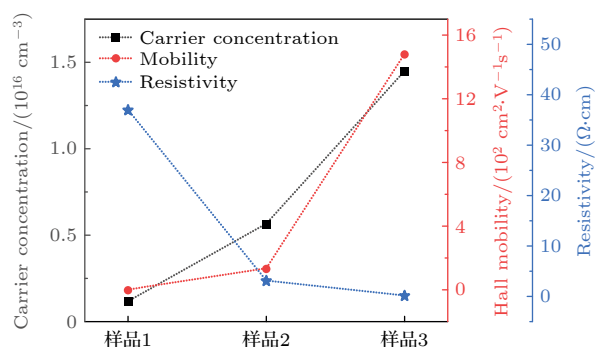
图 9 不同退火方式所制备 In_2O_3 薄膜的电气特性变化

Fig. 9. Variation of electrical properties of In_2O_3 thin films prepared by different annealing methods.

图 10 分别显示了传统热退火和脉冲紫外线辅助热退火方式制备的 In_2O_3 TFT 的电气特性. 图 10(a) 显示的是样品 1、样品 2 和样品 3 器件的输出特性曲线. 其中, 漏极和源极之间的电压 (V_{DS}) 的范围在 0—20 V, 栅极和源极之间的电压 (V_{GS}) 从 0 增加到 20 V, 步长为 5 V. 通过对比可知, 样品 1 和样品 2 的漏极和源极之间的电流 (I_{DS}) 随 V_{DS} 的增大而不断增大直至到达饱和电流, 可以看出两者均具有 n 沟道增强特性. 并且对比样品 1, 在相同 V_{GS} 下样品 2 器件具有更高的电流 I_{DS} , 这是由于样品 2 器件中的载流子浓度较高且薄膜表面均方根粗糙度较低的原因形成的. 而样品 3 器件的电流达到了近 1000 μA , 虽然同样显示了增幅特性, 但在 $V_{\text{DS}} = 20 \text{ V}$ 时并未达到饱和电流. 这是由于脉冲紫外线辅助热退火处理时间延长至 10 min, 致使 In_2O_3 材料中的载流子浓度大幅增加导致的.

图 10(b) 显示的是样品 1、样品 2 和样品 3 器件的转移特性曲线和 $I_{\text{DS}}^{1/2}$ - V_{GS} 曲线. 其中, 转移特

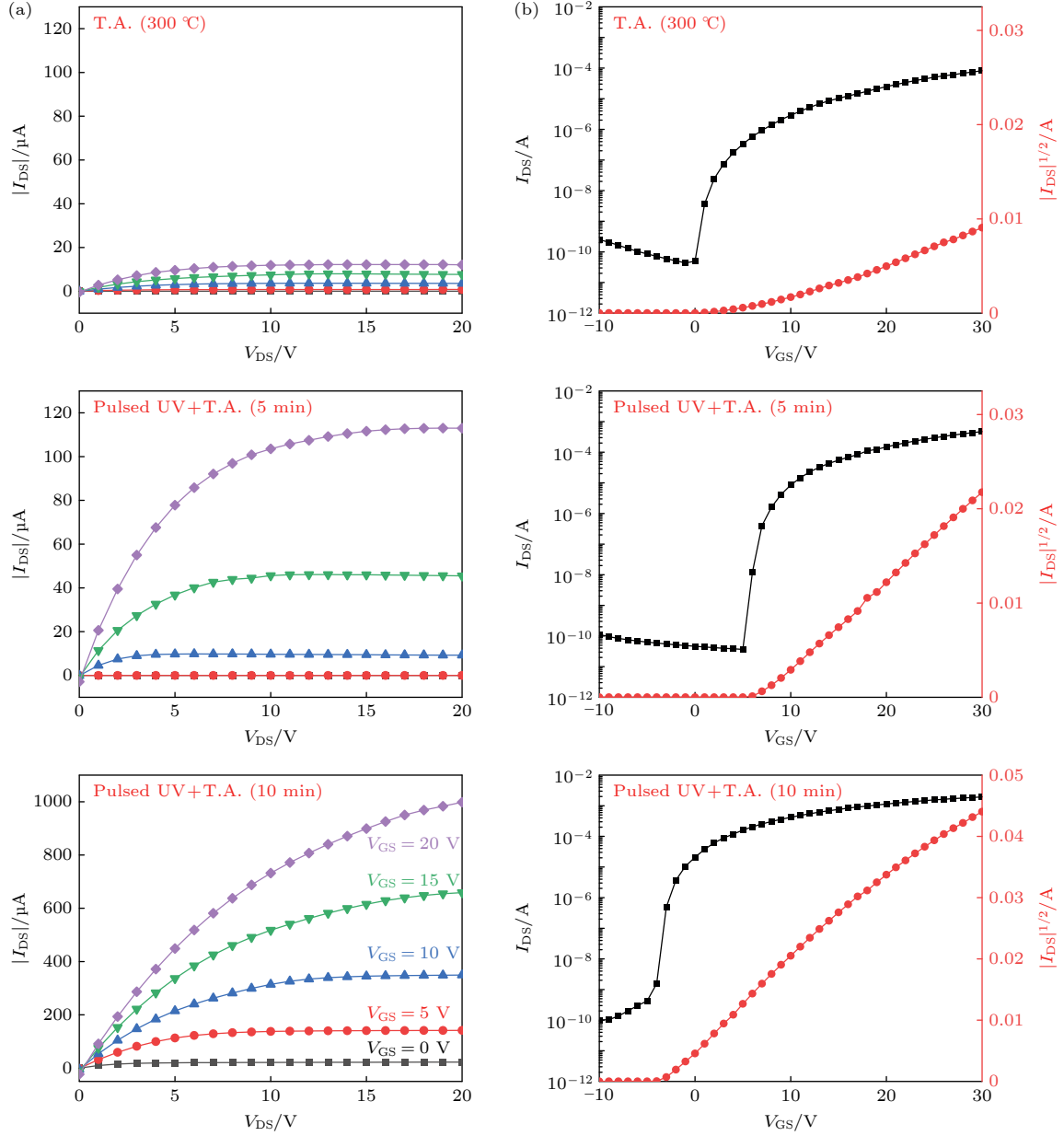


图 10 不同退火方式所制备样品的 (a) 输出特性和 (b) 转移特性

Fig. 10. (a) Output and (b) transfer characteristics of samples prepared by different annealing methods.

性曲线是在恒定电压 V_{DS} 为 15 V, V_{GS} 范围从 -10 — $+30$ V, 以 1 V 的增量进行的测量. 从转移特性曲线可获得的样品 1 和样品 2 器件的开/关电流比 (I_{on}/I_{off}) 分别为 1.88×10^6 和 1.29×10^7 , 亚阈值摆幅分别为 0.17 和 0.12 mV/dec. 从 $I_{DS}^{1/2}$ - V_{GS} 曲线提取样品 1 和样品 2 器件的阈值电压 (V_{TH}) 分别为 7.6 和 7.4 V. 根据图 10(b) 获得的参数, 在饱和区提取的场效应迁移率 (μ_{sat}) 可由以下方程获得:

$$I_{DS} = \frac{W\mu_{sat}C_i}{2L}(V_{GS} - V_{TH})^2, \quad (2)$$

其中, C_i 是单位面积的栅极介电电容, W 和 L 分

别是沟道的宽度和长度. 计算出样品 1 和样品 2 的场效应迁移率分别为 0.22 和 1.27 $\text{cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$. 而样品 3 器件由于 In_2O_3 薄膜内部载流子浓度过高, 器件内部的沟道耗尽层太宽, 致使开关特性消失. 各器件的电学性能参数总结如表 1 所列. 可以清楚地观察到, 样品 2 的电气特性得到了显著改善, 不仅亚阈值摆幅、阈值电压均有所降低, 电流的开关比和场效应迁移率也明显提高. 上述电特性结果表明脉冲紫外线辅助热退火方法在低温条件下的短时间内便可获得高性能的金属氧化物半导体器件.

表 1 不同热退火方式制备 In_2O_3 TFTs 的电学特性参数
Table 1. Electrical parameters of In_2O_3 TFTs prepared by different thermal annealing methods.

样品	亚阈值摆幅 $S.S./(\text{mV}\cdot\text{dec}^{-1})$	电流比 $I_{\text{on}}/I_{\text{off}}$	阈值电压 V_{TH}/V	迁移率 $\mu_{\text{sat}}/(\text{cm}^2\cdot\text{V}^{-1}\cdot\text{s}^{-1})$
样品1 (T.A.)	0.17	1.88×10^6	7.6	0.22
样品2 (Pulsed UV +T.A.-5 min)	0.12	1.29×10^7	7.4	1.27
样品3 (Pulsed UV +T.A.-10 min)	—	—	-2.52	2.43

4 结 论

本文采用了溶液法在 SiN_x/Si 基板上制备了 In_2O_3 TFT. 研究了脉冲紫外线辅助热退火方式和传统热退火方式对 In_2O_3 薄膜和 TFT 的物理、化学以及电学性能的影响. 研究表明: 对比传统热退火方式, 脉冲紫外线辅助热退火方式由于时间较短、温度较低, 所制备的 In_2O_3 薄膜的结晶强度较弱, 但粗糙度得到了有效改善. 结合 XPS 和霍尔效应测试结果可知, 薄膜的氧空位浓度增大, 提升了内部的载流子浓度和霍尔迁移率, 薄膜的电阻率得到了有效降低, 并且随着脉冲紫外线辅助热退火处理时间的延长薄膜所收到的能量增多, 相关数据的变化幅度进一步增大, 导致以脉冲紫外线辅助热退火处理 10 min 所制备 In_2O_3 TFT 的电流大幅增加, 不再显示器件的开关特性. 在脉冲紫外线辅助热退火处理时间为 5 min 时, 器件获得了较好的亚阈值摆幅 ($0.12 \text{ mV}/\text{dec}$) 和阈值电压 (7.4 V), 器件的场效应迁移率 ($1.27 \text{ cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$) 也得到了大幅提升. 此工作通过脉冲紫外线辅助热退火方式在 200°C 的低温条件下 5 min 内获得了高性能的 In_2O_3 薄膜及 TFT, 为低温、快速制备低成本、高性能金属氧化物薄膜晶体管提供了一种有效方法.

参考文献

- [1] He Y L, Wang X Y, Gao Y, Hou Y H, Wan Q 2018 *J. Semicond.* **39** 011005
- [2] Zhou Y, Roy V A L, Xu Z X, Kwong H Y, Wang H B, Lee C S 2011 *Appl. Phys. Lett.* **98** 092904
- [3] Liang K, Wang Y, Shao S S, Luo M M, Pecunia V, Shao L, Zhao J W, Chen Z, Mo L X, Cui Z 2019 *J. Mater. Chem. C* **7** 6169
- [4] Kim S J, Yoon S H, Kim H J 2014 *J. Appl. Phys.* **53** 02BA02
- [5] Choi C H, Han S Y, Su Y W, Fang Z, Lin L Y, Cheng C C, Chang C H 2015 *J. Mater. Chem. C* **3** 854
- [6] Kim M G, Kanatzidis M G, Facchetti A, Marks T J 2011 *Nat. Mater.* **10** 382
- [7] Hwang Y H, Seo J S, Yun J M, Park H J, Yang S H, Park S H K, Bae B S 2013 *NPG Asia Mater.* **5** e45
- [8] Lee H J, Jyothi C, Baang S K, Kwon J H, Bae J H 2016 *J. Korean. Phys. Soc.* **69** 1688
- [9] Zhang X, Lee H J, Kwon J H, Kim E J, Park J H 2017 *Materials* **10** 880
- [10] Park J H, Park W, Na J H, Lee J U, Eun J S, Feng J H, Kim D K, Bae J H 2023 *Nanomaterials* **13** 2568
- [11] Xie Y T, Cai K L, Chen P L, Liu Y, Wang D P 2022 *Chin. J. Lasers* **49** 0703001 (in Chinese) [谢应涛, 蔡坤林, 陈鹏龙, 刘愈, 王东平 2022 *中国激光* **49** 0703001]
- [12] Kim W G, Tak Y J, Ahn B D, Jung T S, Chung K B, Kim H J 2016 *Sci. Rep.* **6** 23039
- [13] Rahman M K, Lu Z, Kwon K S 2018 *AIP Adv.* **8** 095008
- [14] Lee H W, Choi H S, Cho W J 2019 *J. Nanosci. Nanotechnol.* **19** 6164
- [15] Huang H Y, Wang S J, Wu C H, Lu C Y 2014 *Electron. Mater. Lett.* **10** 899
- [16] Kim D W, Park J H, Hwang J U, Kim H D, Ryu J H, Lee K B, Baek K H, Do L M, Choi J S 2015 *Electron. Mater. Lett.* **11** 82
- [17] Park S C, Kim D W, Shin H J, Lee D K, Zhang X, Park J H, Choi J S 2016 *J. Inf. Disp.* **17** 179
- [18] Huet K, Aubin J, Raynal P E, Curvers B, Verstraete A, Lespinasse B, Mazzamuto F, Sciuto A, Lombardo S F, Magna A L, Acosta-Alba P, Dagault L, Licitra C, Hartmann J M, Kerdilès S 2020 *Appl. Surf. Sci.* **505** 144470
- [19] Lee H J, Zhang X, Kim J W, Kim E J, Park J H 2018 *Materials* **11** 2103
- [20] Azianty S, Saadah A R, Boon T G 2018 *Mater. Today* **5** S186
- [21] Xing R Q, Xu L, Song J, Zhou C Y, Li Q L, Liu D L, Song H W 2015 *Sci. Rep.* **5** 10717
- [22] Tetzner K, Isakov I, Regoutz A, Payne D J, Anthopoulos T D 2017 *J. Mater. Chem. C* **5** 59
- [23] Shinde D, Ahn D Y, Jadhav V, Lee D Y, Shrestha N K, Lee J K, Lee H, Mane R S, Han S H 2014 *J. Mater. Chem. A* **2** 5490
- [24] Lin Y H, Liu Y S, Lin Y C, Wei Y S, Liao K S, Lee K R, Lai J Y, Chen H M, Jean Y C, Liu C Y 2013 *J. Appl. Phys.* **113** 033706
- [25] Ide K, Nomura K, Hosono H, Kamiya T 2019 *Phys. Status Solidi A* **216** 1800372
- [26] Biswas P, Ainabayev A, Zhussupbekova A, Jose F, O'Connor R, Kaisha A, Walls B, Shvets I V 2020 *Sci. Rep.* **10** 7463
- [27] Tsay C Y, Liang S C 2017 *Mat. Sci. Semicon. Proc.* **71** 441

Low-temperature rapid preparation of high-performance indium oxide thin films and transistors based on solution technology^{*}

Zhang Xue^{1)†} Kim Bokyoung²⁾ Lee Hyeonju²⁾ Park Jaehoon^{2)‡}

1) (*College of Ocean Science and Engineering, Shangdong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China*)

2) (*Department of Electronic and Electrical Engineering, Hallym University, Chuncheon 24252, Republic of Korea*)

(Received 11 January 2024; revised manuscript received 27 February 2024)

Abstract

Indium oxide (In_2O_3) thin films and thin-film transistors (TFTs) based on the solution process are prepared by pulsed UV-assisted thermal annealing at a low temperature (200 °C) for 5 min. The effects of pulsed UV-assisted thermal annealing on the surface morphology, chemical structure, and electrical properties of the In_2O_3 thin films are investigated, and they are compared with those of conventional thermal annealing (300 °C, 30 min). The experimental results show that the pulsed UV-assisted thermal annealing method can improve the quality of In_2O_3 thin film and the performance of TFT in a short period. The results of atomic force microscopy and field emission scanning electron microscopy show that the surface of the In_2O_3 film is denser and flatter than that of the conventional thermally annealed film, and X-ray photoelectron spectroscopy tests show that the pulsed UV-assisted thermal annealing process generates oxygen vacancies, which increases the carrier concentration and improves the electrical conductivity of the In_2O_3 film. In addition, the effect of pulsed UV-assisted thermal annealing on the electrical characteristics of In_2O_3 TFTs is investigated in a comparative way. The results show that the electrical characteristics of the device are significantly improved: the subthreshold swing decreases to 0.12 mV/dec, the threshold voltage is 7.4 V, the current switching ratio is as high as 1.29×10^7 , and the field effect mobility is enhanced to $1.27 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$. Therefore, pulsed UV-assisted thermal annealing is a simple and fast annealing method, which can rapidly improve the performances of In_2O_3 thin film and TFTs, even under low-temperature conditions.

Keywords: pulsed UV-assisted thermal annealing, indium oxide, solution process, thin film transistor

PACS: 68.55.-a, 82.50.Hp

DOI: [10.7498/aps.73.20240082](https://doi.org/10.7498/aps.73.20240082)

^{*} Project supported by the Young Scientist Exchange Program China-Korea (Grant No. [2021]5).

[†] Corresponding author. E-mail: skd996027@sdust.edu.cn

[‡] Corresponding author. E-mail: jaypark@hallym.ac.kr



低温快速制备基于溶液工艺的高性能氧化铟薄膜及晶体管

张雪 KimBokyung LeeHyeonju ParkJaehoon

Low-temperature rapid preparation of high-performance indium oxide thin films and transistors based on solution technology

Zhang Xue Kim Bokyung Lee Hyeonju Park Jaehoon

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 73, 096802 (2024) DOI: 10.7498/aps.73.20240082

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.73.20240082>

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

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

氢元素对铟镓锌氧化物薄膜晶体管性能的影响

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

物理学报. 2018, 67(9): 098502 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180074>

镨掺杂铟镓氧化物薄膜晶体管的低频噪声特性分析

Analysis of low frequency noise characteristics of praseodymium doped indium gallium oxide thin film transistor

物理学报. 2021, 70(16): 168501 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210368>

溶胶-凝胶法制备氧化锡基薄膜及薄膜晶体管的研究进展

Research progress of tin oxide-based thin films and thin-film transistors prepared by sol-gel method

物理学报. 2020, 69(22): 228102 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200653>

N₂O处理对背沟刻蚀金属氧化物薄膜晶体管性能的影响

Effect of N₂O treatment on performance of back channel etched metal oxide thin film transistors

物理学报. 2022, 71(5): 058503 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20211350>

高负偏光照稳定性的溶液法像素级IZTO TFT

Sol-gel indium-zinc-tin-oxide thin film transistor pixel array with superior stability under negative bias illumination stress

物理学报. 2022, 71(13): 138502 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220154>

铟镓锌氧薄膜晶体管的悬浮栅效应研究

Floating gate effect in amorphous InGaZnO thin-film transistor

物理学报. 2018, 67(4): 047302 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20172325>