Формирование методами печати тонкопленочных транзисторов с полупроводниковым каналом на основе оксида индия—галлия—цинка

© В.В. Иванов, Д.Д. Казаринова, А.А. Лизунова, И.А. Волков, И.С. Власов, Е.В. Колисова, И.А. Цаплин, Д.В. Корнюшин, В.А. Ворошилова, А.А. Лошкарев

Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет) (МФТИ, Физтех),
141701 Долгопрудный, Россия

E-mail: ivanov.vv@mipt.ru

Поступила в Редакцию 31 марта 2026 г.
В окончательной редакции 29 мая 2026 г.
Принята к публикации 1 июня 2026 г.

Проведен анализ влияния способа формирования электродов, атмосферы и маршрута отжига, толщины подзатворного диэлектрика и стехиометрии оксидного полупроводника на значения отношения токов включения и выключения (I_{on}/I_{off}) транзистора с полупроводниковым каналом из оксида индия–галлия–цинка (IGZO). Установлено, что архитектура транзистора с нижним затвором и верхней парой электродов сток–исток из серебра, сформированных методом сухой аэрозольной печати, позволяет повысить подвижность зарядов до $1.4\,см^2/(В\cdot с)$. Предложен гибридный подход для изготовления функциональных слоев транзистора, суть которого заключается в формировании полупроводникового канала IGZO струйной печатью, а серебряных сток-истоковых контактов — сухой аэрозольной печатью. Разработанный подход обеспечивает получение транзисторов с I_{on}/I_{off} до $1.4\cdot10^4$ и подвижностью зарядов до $0.08\,см^2/(В\cdot с)$.

Ключевые слова: IGZO, тонкопленочный транзистор, сухая аэрозольная печать, струйная печать, постобработка.

DOI: 10.61011/FTP.2026.02.63458.9325

1. Введение

Методы печатной электроники, основанные на использовании функциональных чернил, представляют собой активно развивающуюся область, обеспечивающую непосредственную интеграцию электронных компонентов в энергонезависимые носимые датчики, прозрачные и гибкие дисплеи, гибкие накопители энергии и сенсорные системы. Методы струйной и аэрозольной печати обеспечивают экологически и экономически эффективную альтернативу литографии при производстве модулей, не требующих высокого разрешения [1], за счет сокращения количества технологических этапов, отсутствия высокотехнологичных операций и дорогостоящего оборудования, а также возможности формирования микроструктур сложной геометрии на гибких и трехмерных подложках [2,3]. Транзисторы являются ключевым строительным блоком для реализации логических элементов, ячеек памяти, устройств оптоэлектроники, сенсорных экранов и систем преобразования и управления энергией.

Прогресс в области создания полностью печатного транзистора неразрывно связан с совершенствованием материалов для каждого из ключевых компонентов структуры: полупроводникового канала, токопроводящих электродов и подзатворного диэлектрика, а также технологий формирования и постобработки активного элемента с целью улучшения электрических характеристик тонкопленочных транзисторов (ТПТ) при сохранении высокой стабильности и низкой стоимости производства [4,5].

Одним из перспективных типов материалов для полупроводникового канала в ТПТ активно используются оксиды металлов, в частности оксид индия–галлия–цинка (IGZO). Данный материал обеспечивает высокую подвижность носителей заряда до $39.7\,см^2/(В\cdot с)$ [6,7], обладает прозрачностью в видимом диапазоне света и может быть использован для формирования полупроводникового канала ТПТ прямой печатью из растворов прекурсоров с последующим отжигом при сравнительно низких температурах $300-500\,^\circ C$ [4,8].

Тонкие пленки IGZO толщиной $10-50$ нм традиционно получают методами высокочастотного (ВЧ) распыления [9] и магнетронного напыления на постоянном токе [10] с использованием композитной мишени, изготовленной из порошков In_2O_3, Ga_2O_3, ZnO с различным составом [11,12], при этом наиболее распространенным соотношением компонентов является $In:Ga:Zn=1:1:1$ [13]. Транзисторы на пленках, полученных магнетронным напылением, показывают значения отношения токов включения и выключения (I_{on}/I_{off}) до $8.7\cdot10^8$, подвижность $2-28\,см^2/(В\cdot с)$ [7,13,14], пороговое напряжение от 0.4 до 9 В [12,13,15,16]. Кроме этого, усовершенствуются методы плазменно-усиленного атомно-слоевого [17] и импульсного лазерного осаждения [18] для создания аморфных IGZO покрытий нанометровой и субмикронной толщины.

Принципиально иным подходом по сравнению с методами осаждения из паровой фазы являются технологии создания тонких пленок IGZO из жидких дисперсий и истинных растворов прекурсоров, среди которых центрифугирование (спин-коатинг) [19–21] и методы печати [22]. Ключевыми преимуществами печатных методов являются доступная стоимость оборудования и эксплуатационных расходов, возможность обработки гибких и трехмерных подложек, высокая локальность нанесения, простота модификации состава функционального слоя, оперативность прототипирования новых устройств. Кроме того, печатные методы обеспечивают возможность формирования структур сложной геометрии, что выгодно отличает их от спин-коатинга, так как требуют меньшего расхода чернил, что особенно важно при работе с дорогостоящими материалами.

В качестве жидких чернил применяются дисперсии наночастиц IGZO либо смеси истинных растворов прекурсоров, которые после специальной обработки образуют твердый слой IGZO [21]. Наночастицы получают, например, золь-гель синтезом [23] и методом обратных мицелл [24], после чего смесь помещают в буферный раствор со стабилизирующим агентом и подвергают ультразвуковому диспергированию [19,20] и седиментации в центробежном поле. Для приготовления чернил на основе истинных растворов в качестве прекурсоров используют порошки ацетилацетоната галлия ($Ga(C_5H_7O_2)_3$), гидрата ацетилацетоната цинка ($Zn(C_5H_7O_2)_2 \cdot xH_2O$) ацетилацетоната индия ($In(C_5H_7O_2)_3$), растворенные в тетрагидрофуране (THF) [21]. Также смесь с требуемой стехиометрией получают смешением дегидрированного ацетата цинка ($Zn(CH_3COO)22H_2O$), гидрата нитрата индия ($In(NO_3)3H_2O$) и гидрата нитрата галлия ($Ga(NO_3)3H_2O$) в 2-метоксиэтаноле [25]. Аналогично применяются растворы индия (III) хлорид гидрата ($InCl_3 \cdot xH_2O$), галлия (III) нитрат гидрата ($Ga(NO_3) \cdot xH_2O$), ацетата цинка дигидрата ($Zn(CH_3COO)_2 \cdot 2H_2O$) и хлорида сурьмы (III) ($SbCl_3$) или хлорида олова (IV) ($SnCl_4$) в этиловом спирте, 2-метоксиэтаноле и моноэтаноламине [26,27].

Постобработка покрытий на основе IGZO играет одну из определяющих ролей в формировании их высоких функциональных свойств. В современной практике применяются следующие методы: термический отжиг, воздействие импульсного излучения различного спектрального диапазона и плазменная модификация поверхности [28]. В ряде экспериментальных работ изучена постобработка транзисторов на пленках IGZO с применением различных маршрутов нагрева. Обнаружено, что термическая обработка в диапазоне температур 340–550 °C при выдержке 1–3 ч в воздушной атмосфере (в муфельной печи или на нагревательной плитке) позволяет целенаправленно регулировать электрические характеристики устройств [7,28].

Для исследований полупроводниковых свойств IGZO и возможности его применения в качестве полупроводникового канала для ТПТ исследователи формируют транзисторы различной архитектуры. Известны несколько основных типов ТПТ [4]: с верхним (top-gate) и нижним (bottom-gate) [19,20] затвором, верхними и нижними электродами сток–исток [29]. В качестве подложки используются кремниевые пластины и стекло [13,15] с подзатворным диэлектриком из оксида кремния [5,30,31], оксида алюминия (Al_2O_3) [13,15] и оксида гафния [32]. Электроды транзисторов изготавливают методами трафаретной печати из серебряных наночастиц [31], ВЧ магнетронного напыления из алюминия [30], золота [20] и оксида индия–олова (ITO) [5,15,17], литографией, струйной [33] и сухой аэрозольной печатью [34,35].

Таким образом, актуальным и перспективным направлением являются исследования условий получения методами печатной электроники полупроводникового канала транзисторов на основе IGZO. В связи с этим цель настоящей работы состоит в разработке стабильных чернил на основе истинных растворов прекурсоров для изготовления полупроводникового канала IGZO методами спин-коатинг и струйной печати, а также исследовании влияния условий отжига, архитектуры транзистора, материала и метода изготовления электродов на электронные характеристики транзисторов.

2. Материалы и методы

Чернила изготавливались из предварительно растворенных в диметилформамиде (DMF, Scharlab) следующих прекурсоров: гидрата нитрата цинка ($Zn(NO_3)_2 \cdot xH_2O$, 30 мас.%), гидрата нитрата галлия (III) ($Ga(NO_3)_3 \cdot xH_2O$, 30 мас.%) и гидрата нитрата индия (III) ($In(NO_3)_3 \cdot xH_2O$, 50 мас.%) производства Sigma Aldrich. Растворы брали в соотношениях, обеспечивающих получение двух вариантов итогового состава: $In_{6.5}Ga_{1.5}Zn_2O_{14}$ (ink 1) [31] и $In_7Ga_{1.5}Zn_2O_{14}$ (ink 2). Для создания чернил полученный раствор разбавляли DMF в соотношении 1 : 2. Измеренное с помощью анализатора краевого угла Krüss DSA25 поверхностное натяжение чернил составило 39–40 мН/м при комнатной температуре.

Отрабатывались режимы формирования полупроводникового слоя на основе IGZO методами центрифугирования (спин-коатинга) и струйной печати. В качестве подложек использовали кремниевые пластины *p*-типа с термическим слоем оксида кремния с толщинами 100 и 300 нм. Электроды затвора изготавливали из золота (Au) методом фотолитографии (PL). Для формирования электродов стока и истока применяли два подхода. В первом варианте золотые контакты, обеспечивающие ширину канала 500 мкм и длину каналов 30, 20 и 10 мкм, формировались методом литографии. Далее поверх Au-контактов наносили полупроводниковый слой IGZO для создания архитектуры транзистора с нижним затвором с нижним контактом сток–исток (рис. 1, *a*). Во втором варианте серебряные электроды на основе наночастиц серебра (AgNP) формировали методом сухой аэрозоль-

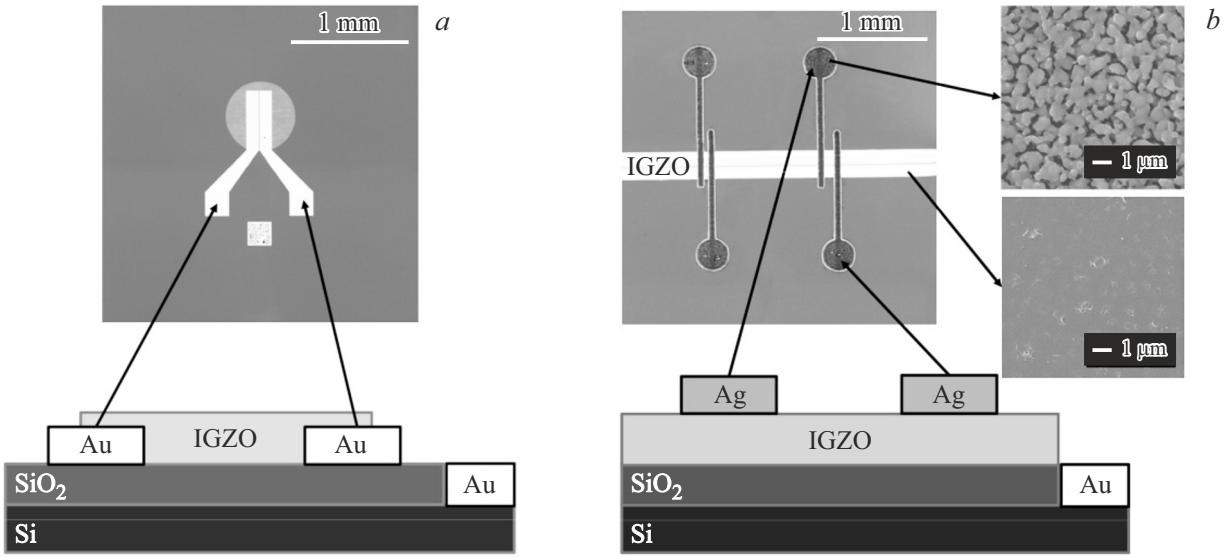


Рис. 1. Схемы и микроструктура транзисторов с различной архитектурой: *a* — нижний затвор с нижним контактом сток–исток (фотолитография, IGZO — спин-коатинг); *b* — гибридный транзистор с нижним затвором с верхним контактом сток–исток (серебряные электроды сформированы методом САП поверх слоя IGZO, полученного струйной печатью), на вставках РЭМ-изображения поверхности: снизу — IGZO пленка, сверху — Ag-электрод.

ной печати (САП, dry aerosol printing, DAP) поверх полупроводникового слоя IGZO. Таким образом, получали архитектуру нижнего затвора с верхним контактом сток–исток (рис. 1, *b*). Печать серебряных электродов осуществлялась на уникальном опытном образце сухого аэрозольного принтера, созданном в МФТИ [34], который объединяет в себе четыре процесса: генерацию в импульсно-периодическом газовом разряде наночастиц серебра в агломератах, их преобразование в квазисферические крупные уединенные наночастицы под воздействием лазерного излучения, локальное осаждение наночастиц через сопло по заданному макету и лазерное спекание осаждаемых частиц на подложке. Указанный метод позволяет формировать металлические микроструктуры сложной геометрии с высоким разрешением без применения маски [36–38]. В данной работе процесс лазерного спекания проводящих дорожек сток–истока был заменен на термическую обработку при 300 °C с целью уменьшения токов утечек в конечном устройстве. Фотографии готовых образцов, а также микроструктуры поверхности Ag-электродов и полупроводниковой пленки IGZO, полученные с помощью растровой электронной микроскопии (РЭМ), представлены на рис. 1.

Формирование слоя IGZO производили с помощью аддитивного метода струйной печати на коммерческом принтере Dimatix Materials DMP-2850 и методом спин-коатинга на центрифуге EZ6-S (12 000 об/мин, 30 с). Перед нанесением полупроводникового слоя подложку очищали с помощью ацетона и отжигали 15 мин при 400 °C для удаления органических загрязнений.

Для получения сложной геометрии поверх центрифугированного слоя IGZO формировалась маска из раствора поликарбоната (ПК) в тетрахлорэтане с концентрацией 40–50 мг/мл. Масочные слои наносились методом микроплоттерной печати (SonoPlot GIX Microplotter II, стеклянный диспенсер с диаметром 400 мкм). Маску сушили при 120 °C в течение 1 ч, после чего образцы подвергали травлению, при этом расположенный под маской полупроводниковый слой сохранял свои свойства.

Постпечатная обработка образцов представляла собой отжиг, который проводили в муфельной печи (ПМ-1ПТР) в атмосфере воздуха, а также в трубчатой печи (Русуниверсаль ПМ-1200) в различных атмосферах: смеси аргона и водорода ($Ar+5\%\,H_2$), азота, аргона и кислорода. Образцы подвергали изотермической выдержке при 400 °C в течение 1 ч. Применяли два режима термической обработки: быстрый отжиг — нагрев от 25 до 400 °C со скоростью 10 °C/мин, медленный отжиг — двухстадийный нагрев от 25 до 80 °C за 10 мин, затем от 80 до 400 °C со скоростью 1 °C/мин.

3. Результаты и обсуждение

Исследовано влияние атмосферы (воздух, O_2, N_2, Ar, $Ar+5\%\,H_2$) и скорости нагрева (1 и 10 °C/мин) на спекание тонких пленок IGZO, сформированных методом спин-коатинга на тестовых структурах с SiO_2-диэлектриком (100 и 300 нм) и Au-электродами (длина канала 10, 20 и 30 мкм). Типичные переходные вольтамперные характеристики (ВАХ) и рассчитанные значения подвижности зарядов и отношения токов включения и выключения I_{on}/I_{off} представлены на рис. 2, *a* и в таблице соответственно.

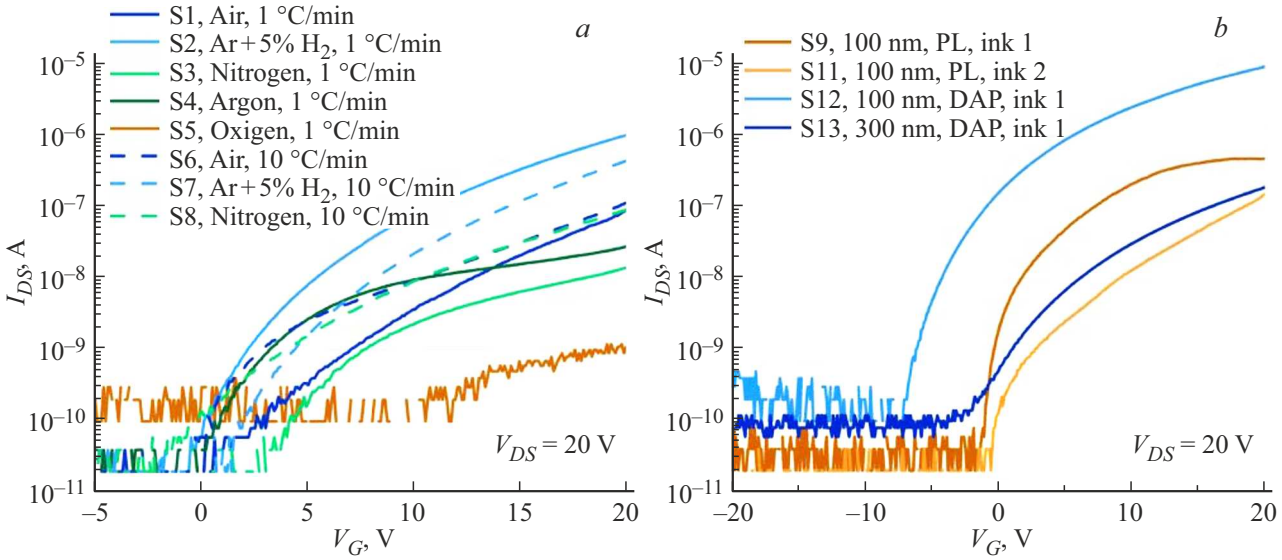


Рис. 2. Вольт-амперные характеристики транзисторов: *a* — влияние атмосферы и скорости отжига на переходные характеристики (зависимости тока сток–исток I_{DS} от напряжения на затворе V_G) образцов IGZO; *b* — влияние состава чернил, толщины подзатворного диэлектрика и архитектуры транзистора на переходные характеристики образцов IGZO. Покрытия получены методом спин–коатинга, измерения выполнены при фиксированном напряжении сток–исток $V_{DS} = 20$ В.

Архитектура, постобработка и электрофизические характеристики полученных транзисторов

Образец	Метод нанесения IGZO	Электроды	Атмосфера отжига	Маршрут отжига	Толщина SiO_2, нм	I_{on}/I_{off}		μ, см^2/(В·с)	
						Максимальное	Среднее	Максимальное	Среднее
S1	Спин-коатинг	Au (ФЛ, PL)	Воздух	1 °C/мин, 400 °C, 1 ч	100	$8.5 \cdot 10^3$	$4.0 \cdot 10^3$	$2.0 \cdot 10^{-3}$	$7.6 \cdot 10^{-4}$
S2			Ar+5 % H_2		100	$\mathbf{6.5 \cdot 10^4}$	$3.2 \cdot 10^4$	$2.1 \cdot 10^{-2}$	$8.1 \cdot 10^{-3}$
S3			Азот		100	$1.4 \cdot 10^3$	$5.8 \cdot 10^2$	$2.5 \cdot 10^{-4}$	$1.2 \cdot 10^{-4}$
S4			Аргон		100	$1.7 \cdot 10^3$	$1.0 \cdot 10^3$	$5.0 \cdot 10^{-4}$	$2.1 \cdot 10^{-4}$
S5			Кислород		100	$1.6 \cdot 10^1$	$8.1 \cdot 10^0$	$1.6 \cdot 10^{-5}$	$1.0 \cdot 10^{-5}$
S6			Воздух	10 °C/мин, 400 °C, 1 ч	100	$2.1 \cdot 10^4$	$7.1 \cdot 10^3$	$2.3 \cdot 10^{-3}$	$1.0 \cdot 10^{-3}$
S7			Ar+5 % H_2		100	$5.2 \cdot 10^4$	$2.2 \cdot 10^4$	$9.5 \cdot 10^{-3}$	$4.2 \cdot 10^{-3}$
S8			Азот		100	$8.1 \cdot 10^3$	$3.2 \cdot 10^3$	$2.1 \cdot 10^{-3}$	$8.2 \cdot 10^{-4}$
S9			Воздух	1 °C/мин 400 °C, 1 ч	100	$1.8 \cdot 10^4$	$5.4 \cdot 10^3$	$4.8 \cdot 10^{-3}$	$2.1 \cdot 10^{-3}$
S10			Воздух	1 °C/мин, 350 °C, 1 ч	100	$1.7 \cdot 10^4$	$5.3 \cdot 10^3$	$3.2 \cdot 10^{-3}$	$9.8 \cdot 10^{-4}$
S11 (ink 2)			Воздух		100	$\mathbf{6.4 \cdot 10^4}$	$1.0 \cdot 10^4$	$3.4 \cdot 10^{-3}$	$1.2 \cdot 10^{-3}$
S12		Ag (САП, DAP)	Воздух	1 °C/мин 400 °C, 1 ч	100	$2.4 \cdot 10^4$	$2.0 \cdot 10^4$	$1.4 \cdot 10^0$	$8.2 \cdot 10^{-1}$
S13			Воздух		300	$2.2 \cdot 10^3$	$1.3 \cdot 10^3$	$8.5 \cdot 10^{-3}$	$5.3 \cdot 10^{-3}$
S14 (ink 2)	Струйная печать		Воздух	10 °C/мин 400 °C, 0.5 ч	100	$\mathbf{1.4 \cdot 10^4}$	$4.8 \cdot 10^3$	$\mathbf{8.4 \cdot 10^{-2}}$	$3.4 \cdot 10^{-2}$

Согласно данным ВАХ, формирование покрытий IGZO в кислородной и азотной атмосферах приводит к низким полупроводниковым свойствам транзисторов. Количественно это выражается в ограничении отношения токов включения и выключения I_{on}/I_{off} на уровне 1–3 порядков, подвижности μ — на уровне 10^{-4} см^2/(В·с), что не удовлетворяет требованиям к компонентам печатной микроэлектроники. Оптимальные электрические характеристики транзисторов достигаются при отжиге в восстановительной атмосфере

($95\,\%\,Ar + 5\%\,H_2$) с медленным нагревом. Важно заметить, что термическая обработка с медленным подъемом температуры инициирует равномерную кристаллизацию пленки IGZO, благодаря чему средние значения отношения токов в открытом и закрытом состояниях возрастают в 4 раза относительно быстрого маршрута нагрева. В серии из 18 устройств среднее отношение токов включения и выключения $I_{on}/I_{off} = 3.2 \cdot 10^4$ (максимум — $6.5 \cdot 10^4$), подвижность носителей заряда — до $0.02\,см^2/(В \cdot с)$, разброс данных незначителен. При отжиге в воздушной атмосфере аналогичные устройства показывают более низкие характеристики: значения I_{on}/I_{off} в среднем в 3 раза ниже, чем у образцов, полученных в смеси аргона с водородом. Исследование долговременной стабильности электрофизических параметров полевых транзисторов после термического отжига в воздушной атмосфере выявило неоднородный временной дрейф порогового напряжения в интервале от -0.3 до $+3$ В. При этом отношение токов включения и выключения демонстрирует относительную устойчивость, сохраняясь в пределах одного порядка.

Для оценки влияния толщины диэлектрического слоя оксида кремния было изготовлено два образца пленки IGZO методом спин-коатинга, поверх которой методом САП были нанесены серебряные электроды (образцы S12 и S13). Согласно переходным характеристикам, показанным на рис. 2, *b* (синяя и голубая кривые), и рассчитанным значениям усиления транзистора (см. таблицу) уменьшение толщины подзатворного диэлектрика позволяет увеличить более чем на 1 порядок отношение токов включения и выключения и подвижность зарядов в полупроводниковой пленке.

Увеличение атомной доли индия в составе чернил с $In_{6.5}Ga_{1.5}Zn_2O_{14}$ (ink 1, S2) до $In_7Ga_{1.5}Zn_2O_{14}$ (ink 2, S11) приводит к незначительному снижению среднего значения отношения токов включения и выключения, при этом максимально достижимые величины I_{on}/I_{off} остаются на одном уровне. Обнаружено, что изменение состава чернил требует корректировки оптимального режима и атмосферы отжига. В частности, для пленок с повышенным содержанием индия наилучшие полупроводниковые свойства наблюдаются после отжига на воздухе при 350 °C. В отличие от пленки с высокой долей индия, низкотемпературный отжиг образца с составом $In_{6.5}Ga_{1.5}Zn_2O_{14}$ в воздушной атмосфере дает втрое меньшие значения I_{on}/I_{off} и подвижности зарядов.

Сравнительный анализ различных типов архитектуры транзисторов на примере образцов S9 и S12 показал, что в среднем отношение токов I_{on}/I_{off} растет в 4 раза — до $2.4 \cdot 10^4$ при формировании серебряных электродов поверх слоя полупроводника, изготовленного методом спин-коатинга, при этом подвижность увеличивается на 2 порядка и достигает значения $1.4\,см^2/(В \cdot с)$ в структуре с верхними электродами сток–исток (рис. 1, *b*) по сравнению с золотыми контактами, изготовленными методом фотолитографии.

Сформированные методом струйной печати полупроводниковые слои IGZO имели толщину от 45 до 65 нм, ширина линии составляла от 150 до 246 мкм. Значения длины канала транзисторов определялись расстоянием между электродами сток–исток, которое задавалось согласно макету в программе сухого аэрозольного принтера. Реальные значения длины канала, измеренные методом оптической профилометрии, составили от 34 до 96 мкм. Максимальных значений подвижности удалось добиться на длине канала 90 мкм. Характерные выходные и переходные характеристики гибридного транзистора изображены на рис. 3.

Переходные ВАХ демонстрируют типичное поведение транзистора с *n*-типом проводимости. Установлено, что пороговое напряжение включения существенно зависит от выбранного рабочего напряжения (напряжения сток–истока). Максимальное абсолютное значение порогового напряжения наблюдается при отрицательных рабочих напряжениях и повышается при росте потенциала на затворе. В режиме положительных рабочих напряжений пороговое напряжение снижается: транзистор переходит в открытое состояние при напряжениях на затворе в диапазоне от -5 до $+2$ В.

В других экспериментальных исследованиях продемонстрирована высокая демонстрируют высокую чувствительность электрофизических характеристик пленок IGZO к параметрам температурной обработки независимо от метода их получения (магнетронного распыления и растворных методов) [21,39]. В частности, для пленок состава $In_2O_3 : Ga_2O_3 : ZnO = 1:1:1$ толщиной 50 нм изучено влияние двухстадийного отжига. Экспериментально показано, что пленки IGZO, подвергнутые исключительно одностадийному отжигу при 300 °C в течение 1 ч на воздухе (относительная влажность 40 %) без предварительной термической обработки, не демонстрируют переходных характеристик. Тогда как при увеличении температуры отжига в первой стадии от 150 до 300 °C наблюдалось несистематическое изменение подвижности и отношений токов включения и выключения, максимальное значение которых наблюдалось при отжиге на 200 °C и составляло $30\,см^2/(В \cdot с)$ и $4 \cdot 10^8$ соответственно. Дополнительно отмечено направленное смещение порогового напряжения от отрицательных к положительным величинам с ростом температуры в первой стадии.

В исследованиях пленок IGZO состава $In : Ga : Zn = 5:1:2$, полученных из смеси нитратов [40], обнаружено, что повышение температуры отжига в диапазоне 300–600 °C приводит к увеличению подвижности носителей заряда на 3 порядка — до $6.4\,см^2/(В \cdot с)$. При этом наблюдается сдвиг порогового напряжения с положительных значений до -37 В при 600 °C [40]. В другой работе изучено влияние атмосферы на быстрый (1 мин) отжиг тонкослойных (6 и 10 нм) пленок IGZO, полученных растворным методом из 2-метоксиэтанола с молярным соотношением $In : Zn : Ga = 6:4:1$ [41]. Показано, что при 400 °C даже увеличение времени от-

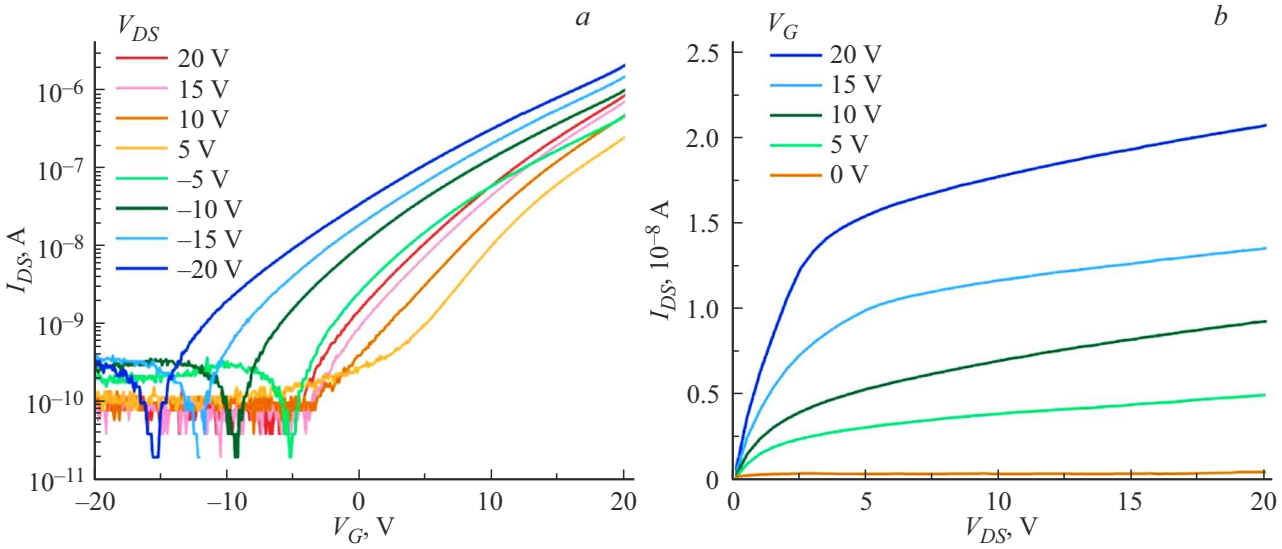


Рис. 3. Серии переходных (*a*) и выходных (*b*) характеристик гибридных транзисторов с полупроводниковым каналом IGZO, полученным методом струйной печати, и электродами из серебра, сформированными сухой аэрозольной печатью.

жига до 60 мин не обеспечивает удовлетворительных электрофизических характеристик. Толщина пленки и температура отжига влияют на оптимальную атмосферу отжига, так для 10-нанометровых слоев подвижность уменьшается в ряду He, Ar, N_2, O_2 в 3 раза при температуре отжига 500 °C в течение 1 мин. Механизм влияния атмосферы связан с тем, что высокая тепловая скорость атомов гелия (в ~ 3 раза выше, чем у других газов при 500 °C) обеспечивает лучшую передачу энергии и более эффективный отжиг дефектов, особенно на интерфейсе с алюминиевыми электродами.

Стремление исследователей создать полностью печатный транзистор активно развивается во всем мире. В работе [42] продемонстрирован транзистор с напечатанными на струйном принтере всеми слоями, за исключением электродов стока и истока; при этом достигнуты значения подвижности носителей заряда до $\sim 32\,см^2/В\cdot с$ учетом корректировки на эффективную емкость устройства. Полностью печатный транзистор, изготовленный методом струйной печати в работе [42], включал контакты из оксида индия–олова (ITO), диэлектрик на основе ионного геля и активный слой IGZO с молярным соотношением In : Ga : Zn = 9 : 1 : 2. Подвижность носителей в активном слое составила $1.2\,см^2/В\cdot с$, однако ключевым ограничением этой технологии стала постобработка — отжиг при 600 °C. Такая температура несовместима с материалами гибкой электроники (полимерами, бумагой и т. д.), что существенно сужает область практического применения устройства. Значения подвижности 4.1 и $0.39\,см^2/В\cdot с$, продемонстрированные в исследованиях [21,31] с пленками $In_{6.5}Ga_{1.5}Zn_2O_{14}$, изготовленными спин-коатингом с последующей термической обработкой при 400 °C и серебряными электродами, близки к представленным в нашей работе. Метод сухой аэрозольной печати электродов с низкотемпературным отжигом (200–300 °C) демонстрирует высокую совместимость с гибкими и полимерными подложками, обеспечивая необходимую проводимость контактов и большие значения подвижности зарядов в полупроводниковом слое IGZO по сравнению с электродами, полученными методом фотолитографии. Однако для реализации полностью печатного транзистора на полимерной основе критически важно усовершенствовать технологии постобработки активного слоя IGZO, снизив температурные требования к его формированию.

4. Заключение

Установлено, что постобработка слоев IGZO, нанесенных методом спин-коатинга с использованием чернил на основе смеси нитратов индия, галлия и цинка (в соотношении, обеспечивающем формирование состава $In_{6.5}Ga_{1.5}Zn_2O_{14}$), имеет принципиальное значение для достижения высоких электрических характеристик транзисторов. Экспериментально разработана методика температурной обработки слоев IGZO с медленным нагревом в восстановительной атмосфере, представляющей собой смесь аргона и 5 % водорода, позволяющая добиться следующих ключевых показателей транзисторов: среднее значение отношения токов включения и выключения I_{on}/I_{off} — $3.2\cdot 10^4$ (максимальное значение — $6.5\cdot 10^4$); подвижность носителей заряд — $0.02\,см^2/(В\cdot с)$, малый разброс значений I_{on}/I_{off} в пределах одного чипа. Для сравнения: в атмосферах аргона, азота и кислорода отношение токов включения и выключения в среднем достигает $\sim 10^3$, в воздушной атмосфере — $6\cdot 10^4$, высокий разброс значений. Также экспериментально показано, что при уменьшении толщины подзатворного диэлектрика SiO_2 с 300 до

100 нм повышается среднее отношение токов включения и выключения практически на порядок и растет значение подвижности. Показано, что архитектура транзистора типа нижний затвор с верхними электродами сток–исток из серебра, полученного методом сухой аэрозольной печати, с полупроводником, полученным спин-коатингом, позволяет повысить подвижность зарядов на 2 порядка и достичь значения $1.4\,см^2/(В \cdot с)$.

Предложена гибридная технология изготовления транзисторов, которая имеет значительный потенциал для развития печатной микроэлектроники. Суть подхода заключается в комбинировании двух методов нанесения функциональных слоев: полупроводниковый слой формируется посредством струйной печати; металлические электроды контактов сток–исток изготавливаются методом сухой аэрозольной печати. Применение данной схемы позволило изготовить транзистор на основе чернил из смеси нитратов, обеспечивающих состав $In_7Ga_{1.5}Zn_2O_{14}$ с последующим отжигом в воздушной атмосфере при 400 °C, позволяет добиться значений $1.4 \cdot 10^4$ и $0.08\,см^2/В \cdot с$ для отношений токов I_{on}/I_{off} и подвижности носителей заряда соответственно.

Полученные результаты свидетельствуют о перспективности гибридной печатной технологии как эффективного направления совершенствования элементной базы микроэлектроники.

Финансирование работы

Исследования выполнены при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках соглашения № 075-15-2024-560.

Благодарности

Работы по изготовлению транзисторных структур методом фотолитографии и электронной микроскопии были выполнены на оборудовании ЦКП МФТИ.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

[1] C.H. Choi, L.Y. Lin, C.C. Cheng, C.H. Chang. ECS J. Solid State Sci. Technol., **4** (4), P3044 (2015). DOI: 10.1149/2.0071504jss
[2] A.S. Dahiya, D. Shakthivel, Y. Kumaresan, A. Zumeit, A. Christou, R. Dahiya. Nano Converg., **7** (1), 33 (2020). DOI: 10.1186/s40580-020-00243-6
[3] C. Hu, B. Li, X. Wang, C. Liu, D. Sun, H. Cheng. Light Sci. Appl., **14** (1), 355 (2025). DOI: 10.1038/s41377-025-01958-z
[4] F. Chen, M. Zhang, Y. Wan, X. Xu, M. Wong, H.S. Kwok. J. Semicond., **44** (9), 091602 (2023). DOI: 10.1088/1674-4926/44/9/091602
[5] Y.S. Kim, T. Hwang, H.J. Oh, J.S. Park, J.S. Park. Adv. Mater. Interfaces, **11** (15), 2301097 (2024). DOI: 10.1002/admi.202301097
[6] W.S. Liu, C.H. Hsu, Y. Jiang, Y.C. Lai, H.C. Kuo. Membranes, **12** (1), 49 (2021). DOI: 10.3390/membranes12010049
[7] J.S. Lee, S. Chang, S.M. Koo, S.Y. Lee. IEEE Electron Dev. Lett., **31** (3), 225 (2010). DOI: 10.1109/LED.2009.2038806
[8] J. Biggs, J. Myers, J. Kufel, E. Ozer, S. Craske, A. Sou, C. Ramsdale, K. Williamson, R. Price, S. White. Nature, **595** (7868), 532 (2021). DOI: 10.1038/s41586-021-03625-w
[9] Y. Liu, B. Sun, Y. Shu, X. Zeng, J. Zhu, J. Yi, J. He. J. Mater. Res. Technol., **9** (3), 5331 (2020). DOI: /10.1016/j.jmrt.2020.03.059
[10] D. Kim, J. Jang, S. Yoon, M. Hong. ECS Trans., **64** (10), 85 (2014). DOI: 10.1149/06410.0085ecst
[11] J. Kim, S. Lv, W. Wang, S. Zheng, C. Wang, Q. Xin, Y. Li, A. Song, J. Kim, J. Jin, J. Zhang. Front. Mater., **12**, 1 (2025). DOI: 10.3389/fmats.2025.1735405
[12] M.S. Kim, H.T. Kim, H. Yoo, D.H. Choi, J.W. Park, T.S. Kim, J.H. Lim, H.J. Kim. ACS Appl. Mater. Interfaces, **13** (27), 31816 (2021). DOI: 10.1021/acsami.1c05565
[13] N. Mohammadian, B.C. Das, L.A. Majewski. IEEE Trans. Electron Dev., **67** (4), 1625 (2020). DOI: 10.1109/TED.2020.2976634
[14] Б.А. Казаркин, А.А. Степанов, Е.В. Муха, И.И. Захарченя, Е.А. Хохлов, А.Г. Смирнов. Докл. БГУИР, **7** (125), 101 (2019). DOI: 10.35596/1729-7648-2019-125-7-101-106
[15] X. Du, G.S. Herman. Sens. Actuators B: Chem., **268**, 123 (2018). DOI: 10.1016/j.snb.2018.04.087
[16] Y. Wang, X.W. Sun, G.K.L. Goh, H.V. Demir, H.Y. Yu. IEEE Trans. Electron Dev., **58** (2), 480 (2011). DOI: 10.1109/TED.2010.2091131
[17] T. Hong, Y.S. Kim, S.H. Choi, J.H. Lim, J.S. Park. Adv. Electron. Mater., **9** (4), 2201208 (2023). DOI: 10.1002/aelm.202201208
[18] K. Nomura, H. Ohta, K. Ueda, T. Kamiya, M. Hirano, H. Hosono. Science, **300** (5623), 1269 (2003). DOI: 10.1126/science.1083212
[19] N. Fukuda, Y. Watanabe, S. Uemura, Y. Yoshida, T. Nakamura, H. Ushijima. J. Mater. Chem. C, **2** (13), 2448 (2014). DOI: 10.1039/c3tc31944j
[20] S. Sanctis, R.C. Hoffmann, N. Koslowski, S. Foro, M. Bruns, J.J. Schneider. Chem. Asian J., **13** (24), 3912 (2018). DOI: 10.1002/asia.201801371
[21] Y. Xie, D. Wang, H.H. Fong. J. Nanomaterials, **2018** (1), 7423469 (2018). DOI: 10.1155/2018/7423469
[22] G.M. Zirnik, A.S. Chernukha, D.A. Uchaev, I.A. Solizoda, S.A. Gudkova, N.S. Nekorysnova, D.A. Vinnik. Nanosyst.: Phys. Chem. Math., **15** (4), 520 (2024). DOI: 10.17586/2220-8054-2024-15-4-520-529
[23] D.E. Zhivulin, I.A. Solizoda, G.M. Zirnik, D.A. Uchaev, A.S. Chernukha, S.A. Gudkova, D.A. Vinnik. J. Struct. Chem., **66** (7), 1360 (2025). DOI: 10.1134/S0022476625070030
[24] А. Чернуха, Г. Зирник, К. Матвеев, Я. Болейко, Т. Маркин, Е. Ананников, А. Лошкарев, С. Гудкова, Д. Винник. Журн. структур. химии, **66** (3), 142135 (2025). DOI: 10.26902/JSC_id142135
[25] B.Y. Su, S.Y. Chu, Y.D. Juang, S.Y. Liu. J. Alloys Compd., **580**, 10 (2013). DOI: 10.1016/j.jallcom.2013.05.077
[26] T.T. Yang, D.H. Kuo. Mater. Today Commun., **24**, 101059 (2020). DOI: 10.1016/j.mtcomm.2020.101059

[27] T.T. Yang, D.H. Kuo, K.P. Tang. J. Non-Cryst. Sol., **553**, 120503 (2021). DOI: 10.1016/j.jnoncrysol.2020.120503
[28] J. Park, Z. Xiao, S. Lv, Z. Yan, J. Zhang, J. Jin, J. Kim. Semicond. Sci. Technol., **40** (11), 115013 (2025). DOI: 10.1088/1361-6641/ae1869
[29] S.K. Park, Y.H. Kim, J.I. Han. J. Phys. D: Appl. Phys., **42** (12), 125102 (2009). DOI: 10.1088/0022-3727/42/12/125102
[30] I.S. Lee, Y.J. Tak, B.H. Kang, H. Yoo, S. Jung, H.J. Kim. ACS Appl. Mater. Interfaces, **12** (16), 19123 (2020). DOI: 10.1021/acsami.9b22831
[31] C.J. Moon, J.W. Park, Y.R. Jang, H.S. Kim. Sci. Rep., **14** (1), 1566 (2024). DOI: 10.1038/s41598-024-52096-2
[32] G. Kim, S. Kim, M. Kim, C. Choi. Appl. Surf. Sci., **689**, 162365 (2025). DOI: 10.1016/j.apsusc.2025.162365
[33] K. Liang, Y. Wang, S. Shao, M. Luo, V. Pecunia, L. Shao, J. Zhao, Z. Chen, L. Mo, Z. Cui. J. Mater. Chem. C, **7** (20), 6169 (2019). DOI: 10.1039/C8TC06596A
[34] V.V. Ivanov, V.I. Borisov, V.A. Dolgov, D.V. Kornyushin, M.S. Ivanov, V.A. Voroshilova, M.N. Urazov. Russ. J. Phys. Chem. A, **99** (12), 3114 (2025). DOI: 10.1134/S0036024425702553
[35] A. Lizunova, A. Sanatulina, A. Novoselov, E. Khramov, O. Vershinina, E. Kameneva, E. Kolisova, G. Zirnik, D. Malo, V. Ivanov. Nano-Struct. Nano-Objects, **44**, 101591 (2025). DOI: 10.1016/j.nanoso.2025.101591
[36] V. Ivanov, A. Lizunova, O. Rodionova, A. Kostrov, D. Kornyushin, A. Aybush, A. Golodyayeva, A. Efimov, V. Nadtochenko. Nanomaterials, **12** (3), 448 (2022). DOI: 10.3390/nano12030448
[37] K. Khabarov, D. Kornyushin, B. Masnaviev, D. Tuzhilin, D. Saprykin, A. Efimov, V. Ivanov. Appl. Sci., **10** (1), 246 (2019). DOI: 10.3390/app10010246
[38] A.A. Efimov, D.V. Kornyushin, A.I. Buchnev, E.I. Kameneva, A.A. Lizunova, P.V. Arsenov, A.E. Varfolomeev, N.B. Pavzderin, A.V. Nikonov, V.V. Ivanov. Appl. Sci., **11** (13), 5791 (2021). DOI: 10.3390/app11135791
[39] S. Zheng, C. Wang, S. Lv, L. Dong, Z. Li, Q. Xin, A. Song, J. Zhang, Y. Li. Nanomaterials, **15** (6), 460 (2025). DOI: 10.3390/nano15060460
[40] S. Hwang, J.H. Lee, C.H. Woo, J.Y. Lee, H.K. Cho. Thin Sol. Films, **519** (15), 5146 (2011). DOI: 10.1016/j.tsf.2011.01.074
[41] S. Kil, J. Jeong. AIP Adv., **13** (11) (2023). DOI: 10.1063/5.0174995
[42] J.R. Pradhan, M. Singh, S. Dasgupta. Adv. Electron. Mater., **8** (11), 2200528 (2022). DOI: 10.1002/aelm.202200528

Редактор А.Н. Смирнов

Formation of Indium Gallium Zinc Oxide-Based Thin-Film Transistors with a Semiconductor Channel by Printing Methods

V.V. Ivanov, D.D. Kazarinova, A.A. Lizunova, I.A. Volkov, I.S. Vlasov, E.V. Kolisova, I.A. Tsaplin, D.V. Kornyushin, V.A. Voroshilova, A.A. Loshkarev

Moscow Institute of Physics and Technology (National University) (MIPT, Phystech), 141701 Dolgoprudny, Russia

Abstract A comprehensive study explores the impact of electrodes' formation methods, annealing parameters, gate dielectric thickness, and semiconductor composition on the electrical performance of indium–gallium–zinc oxide (IGZO) transistors. We demonstrated that slow heating in an air maximizes the on to off current ratio (I_{on}/I_{off}) and lower–gate upper drain–source architecture with silver contacts, fabricated via dry aerosol printing, boosts charge mobility. Finally, a hybrid fabrication method was introduced, combining inkjet printing of the semiconductor channel with dry aerosol printing of silver drain–source contacts. This approach enables the production of transistors exhibiting I_{on}/I_{off} up to $1.4 \cdot 10^4$ and charge mobility of $0.08\,cm^2/(V \cdot s)$.