



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2019-125-7-101-106>

Оригинальная статья  
Original paper

УДК 621.382

## ТОНКОПЛЕНОЧНЫЕ ТРАНЗИСТОРЫ С InGaZnO-ПОЛУПРОВОДНИКОВЫМ СЛОЕМ ДЛЯ АКТИВНО-МАТРИЧНОЙ АДРЕСАЦИИ

КАЗАРКИН Б.А.<sup>1</sup>, СТЕПАНОВ А.А.<sup>1</sup>, МУХА Е.В.<sup>1</sup>, ЗАХАРЧЕНЯ И.И.<sup>1</sup>,  
ХОХЛОВ Е.А.<sup>2</sup>, СМИРНОВ А.Г.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, г. Минск, Республика Беларусь  
<sup>2</sup>Группа компаний «ИЗОВАК», г. Минск, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 18 ноября 2019

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2019

**Аннотация.** В работе представлены результаты исследования тонкопленочных транзисторов на основе полупроводникового соединения InGaZnO (IGZO) для активно-матричной адресации дисплеев, формируемого методом магнетронного плазмохимического осаждения. Исследованы их структурно-морфологические и электрофизические свойства. Проведен анализ подвижности носителей заряда методом Холла. Изучено влияние отжига в вакууме, атмосфере кислорода и атмосфере азота на размер зерен пленки IGZO. Полученные слои характеризуются высокой подвижностью носителей заряда, что позволяет их использовать при изготовлении ЖК- и OLED-дисплеев нового поколения.

**Ключевые слова:** оксид индия-галлия-цинка, прозрачные проводящие слои, дисплейная техника.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Благодарности.** Работа выполнена в рамках задания 4.03 ГНПИ «Конвергенция». Выражаем благодарность научно-технической фирме «ИЗОВАК», сотрудникам ОАО «ИНТЕГРАЛ» за предоставленную возможность использования технологического и контрольно-измерительного оборудования.

**Для цитирования.** Казаркин Б.А., Степанов А.А., Муха Е.В., Захарченя И.И., Хохлов Е.А., Смирнов А.Г. Тонкопленочные транзисторы с InGaZnO-полупроводниковым слоем для активно-матричной адресации. Доклады БГУИР. 2019; 7(125): 101-106.

## THIN FILM TRANSISTORS WITH InGaZnO-SEMICONDUCTOR LAYER FOR ACTIVE MATRIX ADDRESSING

BARYS A. KAZARKIN<sup>1</sup>, ANDREI A. STEPANOV<sup>1</sup>, YAUHEN U. MUKHA<sup>1</sup>,  
ILIA I. ZAKHARCHENIA<sup>1</sup>, YAUHEN A. KHAKHLOU<sup>2</sup>, ALIAKSANDR G. SMIRNOV<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus  
<sup>2</sup>IZOVAC Group, Minsk, Republic of Belarus

Submitted 18 November 2019

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2019

**Abstract.** The paper presents the results of a study of thin-film transistors based on the InGaZnO semiconductor

compound (IGZO) for active-matrix displays addressing formed by magnetron plasma-chemical deposition. Their structural-morphological and electrophysical properties are investigated. Carrier mobility is analyzed using the Hall method. The effect of annealing in vacuum, an oxygen atmosphere, and a nitrogen atmosphere on the grain size of an IGZO film was investigated. The resulting layers are characterized by high mobility of charge carriers, which allows their use in the manufacture of new-generation LCD and OLED displays.

**Keywords:** indium-gallium-zinc oxide, transparent conducting layers, display technology.

**Conflict of interests.** The authors declare no conflict of interests.

**Gratitude.** This work was carried out as part of assignment 4.03 of the National Research and Design Institute “Convergence”. We express our gratitude to the scientific and technical company “IZOVAK”, employees of OJSC “INTEGRAL” for the opportunity to use technological and control equipment.

**For citation.** Kazarkin B.A., Stepanov A.A., Mukha Y.U., Zakharchenia I.I., Khakhlou Y.A., Smirnov A.G. Thin film transistors with InGaZnO-semiconductor layer for active matrix addressing. Doklady BGUIR. 2019; 7(125): 101-106.

## Введение

Тонкая пленка многокомпонентного полупроводникового соединения InGaZnO (IGZO) представляет собой аморфный оптически прозрачный токопроводящий оксид *n*-типа. Интерес к получению и исследованию таких полупроводниковых оксидов особенно возрос в последние годы с развитием так называемой «гибкой» электроники. IGZO-материал является идеальным материалом по нескольким причинам, включая его оптические свойства, аморфную природу и возможность формировать пленки низкотемпературными методами. IGZO-материал продемонстрировал многообещающие результаты в широком спектре применений, включая (но не ограничиваясь ими) прозрачные тонкопленочные транзисторы (ТПТ), ультрафиолетовые сенсоры и контакты с фотоэлектриками. При этом тонкопленочные транзисторы представляют особый интерес, поскольку широко используются для активно-матричной адресации ЖК- и OLED-экранов телевизоров, ноутбуков, смартфонов и др., в том числе на гибких подложках. Несмотря на то что аморфный и поликристаллический кремний, а также разнообразные органические полупроводниковые материалы широко используются в таких устройствах в настоящее время, их недостатки хорошо известны и практически мало устранимы. Так, например, аморфный кремний ( $\alpha$ -Si) непрозрачен в видимой области спектра, имеет малую подвижность носителей заряда и, следовательно, низкое быстродействие ТПТ, высокую фоточувствительность. Сравнительный анализ электрофизических свойств IGZO и других материалов, используемых при формировании ТПТ, приведен в табл. 1.

**Таблица 1.** Сравнение свойств InGaZnO и других материалов, используемых в качестве активного слоя в ТПТ  
**Table 1.** Comparison of the properties of InGaZnO and other materials used as an active layer in TPT

Материал Material	$\alpha$ -IGZO	$\alpha$ -Si	poly-Si	Органические полупроводники Organic Semiconductors
Подвижность, $\text{cm}^2/\text{V}$ Mobility, $\text{cm}^2/\text{V}$	3–35	0,5–1	30–300	0,1
Температура формирования, $^{\circ}\text{C}$ Formation temperature, $^{\circ}\text{C}$	$\sim 250^{\circ}\text{C}$	$\sim 350^{\circ}\text{C}$	$\sim 500^{\circ}\text{C}$	$< 150^{\circ}\text{C}$
Прозрачность, % Transparency, %	$> 80\%$	$< 20\%$	$< 20\%$	$> 80\%$
Равномерность на больших площадях Uniformity over large areas	Хорошая	Хорошая	Плохая	Хорошая
Стоимость производства Production cost	Низкая	Низкая	Высокая	Низкая
Подложки Substrates	Стекло, пластик, бумага	Стекло	Кварц	Стекло, пластик

Как видно из табл. 1, IGZO обладает рядом преимуществ перед Si из-за высокой прозрачности и более широкого спектра возможных типов подложек, а также более низкой температуры осаждения. Использование дешевых бумаги или пластика в качестве подложки

экономически выгодно за счет снижения себестоимости конечного устройства. Кроме того, это позволяет эффективно использовать технологию с рулона-на-рулон (roll-to-roll). Относительно более простой метод осаждения – распыление IGZO-мишени в газовой среде – при варьировании параметров процесса позволяет прецизионно контролировать электрооптические свойства получаемого материала.

Основное преимущество IGZO перед органическими полупроводниками – стабильность свойств и значительно более высокая подвижность носителей заряда при полевом эффекте.

Таким образом, баланс требуемых свойств, присущих IGZO, делает его перспективным материалом оптоэлектроники, фотоники и дисплейной техники.

### Методика проведения эксперимента

На стеклянных подложках размером  $60,0 \times 48,0 \times 1,1$  мм были сформированы массивы тестовых структур ТПТ, отличающихся толщиной активного слоя (IGZO), шириной и длиной затвора. Формирование тестовых структур происходило в несколько этапов: вначале на стеклянную подложку методом плазмохимического осаждения (ПХО) из газовой фазы наносили буферный слой  $\text{Si}_3\text{N}_4$  толщиной 100 нм. Далее формировали затвор из Мо толщиной 200 нм методом магнетронного осаждения. Затворный диэлектрик  $\text{SiO}_2$  толщиной 100 нм формировали ПХО методом. Активный слой IGZO с толщинами 75 и 150 нм нанесен магнетронным распылением при расходе  $\text{Ar}$  50 сссм и  $\text{O}_2$  10 сссм. Сток/истоковые области толщиной 200 нм получены методом магнетронного напыления. Пассивирующий слой  $\text{SiO}_2$  толщиной 500 нм сформирован при помощи ПХО. Вскрытие контактных окон производили с помощью «сухого» реактивного ионного травления. Подвижность материала IGZO определяли при помощи четырехзондового холловского метода на установке Escoria Hall Effect Measurement Systems HMS-5000. Для исследования влияния на структуру поверхности и размер зерен слоя IGZO был проведен отжиг в вакууме, кислороде и азоте. Для сканирования поверхности IGZO использовали растровый электронный микроскоп SUPRA – 55WDS.

### Результаты и их обсуждение

На рис. 1 приведено схематическое изображение поперечного вида сформированной тестовой структуры ТПТ на основе IGZO.

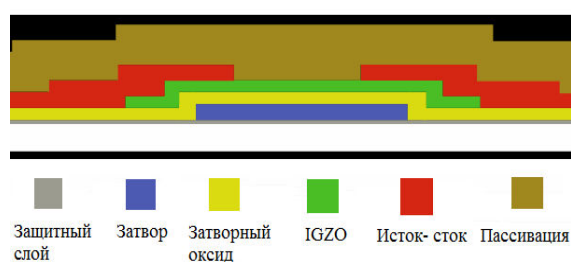
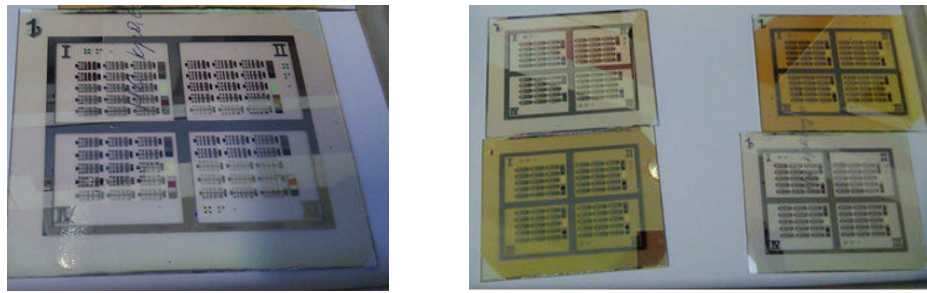


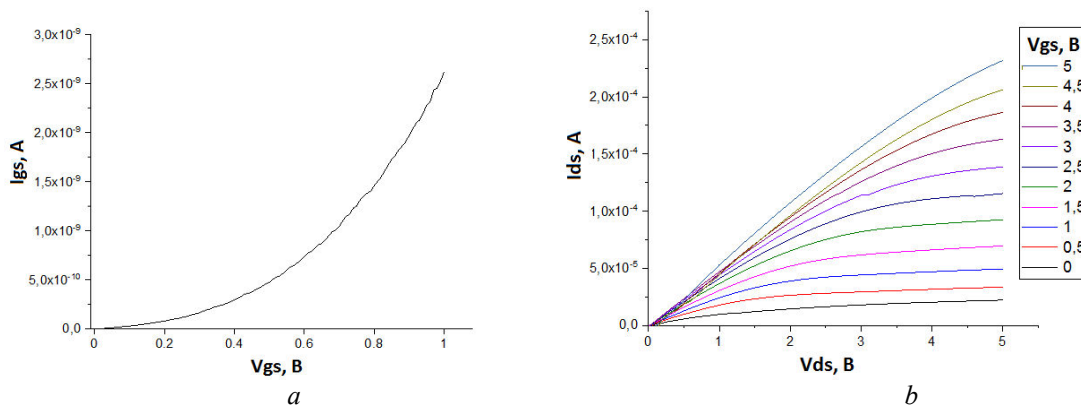
Рис. 1. Схематическое представление тестовой структуры ТПТ на основе IGZO  
Fig. 1. Schematic representation of the test structure of TPT based on IGZO

Фотографии образцов тестовых структур ТПТ, сформированных на стеклянной подложке с активным слоем IGZO, представлены на рис. 2. Значения Холловской подвижности носителей в активном слое для образцов тестовых структур ТПТ составляли  $4\text{--}5 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ . Микроструктуры пленок  $\alpha$ -IGZO были охарактеризованы с помощью анализа, проведенного с использованием растрового электронного микроскопа (РЭМ). На рис. 4 показаны РЭМ-изображения пленок  $\alpha$ -IGZO, не отожженных, отожженных при  $450^\circ\text{C}$  в вакууме,  $\text{O}_2$  и  $\text{N}_2$ . Отжиг производили на предприятии «ИЗОВАК». По сравнению с неотожженным образцом морфология IGZO с температурами отжига  $450^\circ\text{C}$  была плотной и однородной. Средний размер зерен IGZO для неотожженного образца составлял  $12\text{--}14$  нм, для отожженного в вакууме –  $14\text{--}16$  нм и  $16\text{--}18$  нм – для отожженных в атмосфере кислорода и азота.

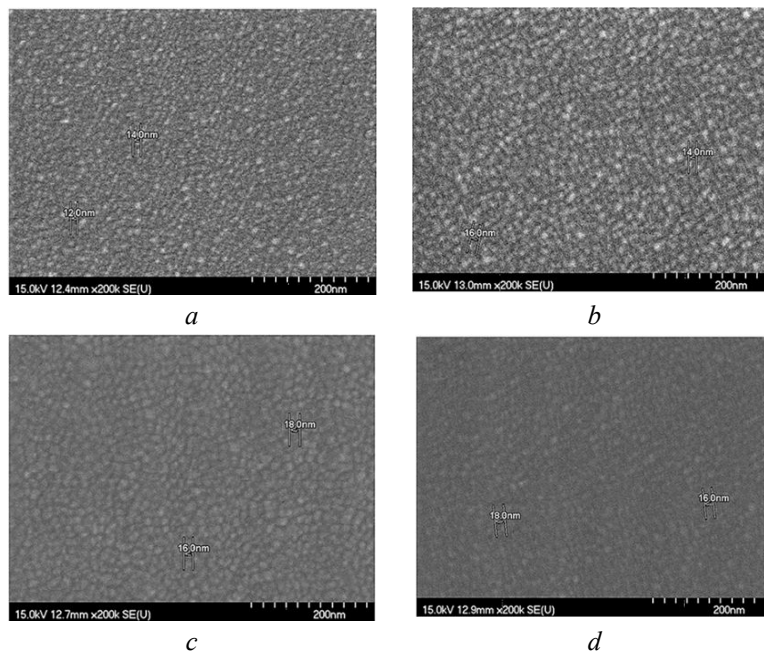


**Рис. 2.** Фотографии образцов тестовых структур ТПТ с активным слоем IGZO  
**Fig. 2.** Photographs of samples of TPT test structures with the IGZO active layer

На рис 3 представлены типичные вольт-амперные характеристики тестовых образцов.



**Рис. 3.** Вольт-амперные характеристики образцов тестовых структур ТПТ с активным слоем IGZO: *a* – исток-затворная характеристика; *b* – стоковые характеристики при различных напряжениях на затворе  
**Fig. 3.** Current – voltage characteristics of samples of TPT test structures with an active layer of IGZO: *a* – source – gate characteristic; *b* – stock characteristics at various gate voltages



**Рис. 4.** РЭМ-изображения морфологии поверхности пленок *a*-IGZO: не отожженных (*a*), отожженных в вакууме (*b*),  $O_2$  (*c*) и  $N_2$  (*d*)

**Fig. 4.** SEM images of the surface morphology of *a*-IGZO films: not annealed (*a*), annealed in vacuum (*b*),  $O_2$  (*c*) and  $N_2$  (*d*)

## Заклучение

Комплекс экспериментальных исследований тонкопленочных активно-матричных структур на основе полупроводникового соединения InGaZnO, полученного методом магнетронного плазмохимического осаждения, включал разработку технологического процесса их формирования на стеклянной подложке, изготовление комплекта фотошаблонов, изготовление указанных структур и исследование их структурно-морфологических и электрофизических свойств. Показано, что полученные структуры характеризуются высокой подвижностью носителей заряда, что позволяет их использование для активно-матричной адресации ЖК- и OLED-дисплеев нового поколения. Отжиг в атмосфере кислорода или азота позволяет увеличить размер зерен IGZO и улучшить морфологию поверхности. Возможна дальнейшая оптимизация технологии формирования IGZO структур с целью улучшения их электрофизических параметров.

## Список литературы / References

1. Kamiya T., Nomura K., and Hosono H. Present status of amorphous In–Ga–Zn–O thin-film transistors. *Science and Technology of Advanced Materials*. 2010; 11 (4): 044305.
2. Shin, Y.; Kim, S. T.; Kim, K.; Kim, M. Y.; Oh, S.; Jeong, J. K. J. The Mobility Enhancement of Indium Gallium Zinc Oxide Transistors via Low-Temperature Crystallization Using a Tantalum Catalytic Layer. *Sci. Rep.* 2017; 7: 10885.
3. Hosono H., et al. Transparent Amorphous Oxide Semiconductors for High Performance, SID'07, Dig., 2007;1830.
4. Suresh A. and Muth J. F. Bias stress stability of indium gallium zinc oxide channel based transparent thin film transistors. *Applied Physics Letters*, 2008; 92 (3):033502.
5. Yoon, S.-J.; Seong, N.-J.; Choi, K.; Shin, W.-C.; Yoon, S.-M. Investigations on the bias temperature stabilities of oxide thin film transistors using In-Ga-Zn-O channels prepared by atomic layer deposition. *RSC Adv.* 2018; 8: 25014-25020.
6. Nomura K., et al. Origins of threshold voltage shifts in room-temperature deposited and annealed a-In–Ga–Zn–O thin-film transistors. *Applied Physics Letters*, 2009; 95: 013502.
7. Kim, G. H.; Shin, H. S.; Ahn, B. D.; Kim, K. H.; Park, W. J.; Kim, H. J. Formation Mechanism of Solution-Processed Nanocrystalline InGaZnO Thin Film as Active Channel Layer in Thin-Film Transistor. *J. Electrochem. Soc.* 2009; 156, 7-9.

## Вклад авторов

Все авторы в равной степени внесли вклад в разработку концепции и планирование представленной научной работы, получение данных, их анализ и интерпретацию.

## Authors contribution

All authors have equally contributed to the development of the concept and planning provided by research, data acquisition, analysis and interpretation.

### Сведения об авторах

Казаркин Б.А., аспирант Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Степанов А.А., старший научный сотрудник НИЛ 4.7 НИЧ Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Муха Е.В., научный сотрудник НИЛ 4.7 НИЧ Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

### Information about the authors

Kazarkin B.A., PG student of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Stepanov A.A., senior researcher of SRL 4.7 of R&D Department of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Mukha Y.U., researcher of SRL 4.7 of R&D Department of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Захарченя И.И., инженер-электроник НИЛ 4.7 НИЧ Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Zakharchenia I.I., electronic engineer of SRL 4.7 of R&D Department of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Хохлов Е.А., начальник управления технологических разработок ООО «ИЗОВАК технологии» группы компаний «ИЗОВАК».

Khakhlou Y.A., head of Technological Development Department, IZOVAC Technologies LLC, IZOVAC Group.

Смирнов А.Г., д.т.н., профессор, заведующий НИЛ 4.7 НИЧ Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Smirnov A.G., Doctor of Technical Sciences, professor, head of SRL 4.7 of R&D Department of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

**Адрес для корреспонденции**

220013, Республика Беларусь,  
г. Минск, ул. П. Бровки, д. 6,  
Белорусский государственный университет  
информатики и радиоэлектроники  
тел. +375-17-293-88-75;  
e-mail: smirnov@bsuir.by  
Смирнов Александр Георгиевич

**Address for correspondence**

220013, Republic of Belarus,  
Minsk, P. Brovki st., 6,  
Belarusian State University  
of Informatics and Radioelectronics  
tel. +375-17-293-88-75;  
e-mail: smirnov@bsuir.by  
Smirnov Aliaksandr Georgievich