

УДК 538.911

DOI: 10.18384/2310-7251-2022-3-58-73

## СИНТЕЗ МНОГОСЛОЙНЫХ СТРУКТУР НА ОСНОВЕ ОКСИДА ЦИНКА С ПЕРИОДИЧЕСКОЙ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ЛОКАЛИЗАЦИЕЙ ДОНОРНОЙ ПРИМЕСИ

Абдуев А. Х.<sup>1,2</sup>, Ахмедов А. К.<sup>3</sup>, Мурлиев Э. К.<sup>3</sup>, Беляев В. В.<sup>1,2</sup>, Асваров А. Ш.<sup>3</sup>, Фрах М. А. А.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Московский государственный областной университет  
141014, Московская обл., г. Мытищи, ул. Веры Волошиной, д. 24, Российская Федерация

<sup>2</sup> Российский университет дружбы народов  
117198, г. Москва, улица Миклухо-Маклая, д. 6, Российская Федерация

<sup>3</sup> Институт физики им. Х. И. Амирханова  
Дагестанского федерального исследовательского центра Российской академии наук  
367015, г. Махачкала, ул. М. Ярагского, д. 94, Российская Федерация

### Аннотация

**Цель.** Изучение процессов формирования, электрических и оптических свойств многослойных тонкоплёночных периодических структур на основе чередующихся слоёв нелегированного и легированного алюминием оксида цинка в зависимости от толщины единичных слоёв и температуры синтеза.

**Процедура и методы.** Синтез периодических структур выполнен в едином вакуумном цикле путём последовательного осаждения слоёв из двух магнетронных источников. Проведено сравнительное исследование структуры и функциональных свойств одиночных слоёв нелегированного и легированного алюминием оксида цинка, а также многослойных структур на их основе с использованием методов рентгеновской дифракции, растровой электронной микроскопии, оптической спектроскопии.

**Результаты.** Установлены механизмы трансформации многослойных тонкоплёночных структур  $n \times (\text{AZO}/\text{ZnO})$  с изменением толщины элементарных слоёв и температур синтеза.

**Теоретическая и практическая значимость.** Результаты исследований показывают пути создания альтернативных прозрачных электродов на основе многослойных структур  $n \times (\text{AZO}/\text{ZnO})$  для устройств прозрачной электроники нового поколения.

**Ключевые слова:** магнетронное распыление, многослойная периодическая структура, оптическое пропускание, электрическая проводимость, оксид цинка, легирование

**Благодарности.** Работы выполнены при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 22-19-00157) с привлечением оборудования Аналитического центра коллективного пользования Дагестанского федерального исследовательского центра РАН.

## SYNTHESIS OF ZNO-BASED MULTILAYER STRUCTURES WITH PERIODIC SPATIAL LOCALIZATION OF A DONOR IMPURITY

**A. Abduev<sup>1,2</sup>, A. Akhmedov<sup>3</sup>, E. Murliev<sup>3</sup>, V. Belyev<sup>1,2</sup>, A. Asvarov<sup>3</sup>, M. A. A. Frah<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> *Moscow Region State University,*

*ul. Very Voloshinoy 24, Mytishchi 141014, Moscow Region, Russian Federation*

<sup>2</sup> *RUDN University (Peoples' Friendship University of Russia)*

*ul. Miklukho-Maklaya 6, Moscow 117198, Russian Federation*

<sup>3</sup> *Institute of Physics of the Daghestan Federal Scientific Center of the Russian Academy of Science*

*ul. M. Yaragskogo 94, Makhachkala 367015, Russian Federation*

### **Abstract**

**Aim.** We study the growth processes and electrical and optical properties of periodic multilayer structures based on alternating layers of undoped and Al-doped zinc oxide as functions of the thickness of single layers and synthesis temperature.

**Methodology.** Periodic multilayer structures are deposited in a single vacuum cycle by sequential deposition of undoped and Al-doped ZnO layers from two magnetron sources. A comparative study of the structure and functional properties of single layers of undoped and Al-doped ZnO, as well as multilayer structures based on them, is performed using XRD, SEM, and optical spectroscopy.

**Results.** The structural transformation in  $n \times (\text{AZO}/\text{ZnO})$  multilayers are studied depending on the thickness and number of elementary layers, as well as on the synthesis temperature.

**Research implications.** The obtained results show ways to produce alternative transparent electrodes based on  $n \times (\text{AZO}/\text{ZnO})$  multilayer structures for new generation transparent electronic devices.

**Keywords:** magnetron sputtering, periodic multilayers, transmittance, conductivity, ZnO, doping

**Acknowledgments.** The work was supported by the Russian Science Foundation (Grant No. 22-19-00157) with the use of the equipment of the Analytical Center for Collective Use of the Daghestan Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences.

### **Введение**

Поиск альтернативных материалов для замены прозрачных электродов на основе  $\text{In}_2\text{O}_3\text{-SnO}_2$  (indium tin oxide, *ITO*) является одной из наиболее актуальных задач, стоящих перед индустрией прозрачной электроники, обусловленной не только необходимостью снижения стоимости используемых материалов, но и рядом новых требований к характеристикам функциональных слоёв, сформулированных в рамках концепции перехода к гибкой прозрачной электронике на полимерных носителях [1]. В настоящее время поиск новых материалов ведётся сразу по нескольким независимым направлениям. В частности активно исследуются различные композиции широкозонных оксидов металлов [2; 3], перколяционные системы на основе нанонитей металлов, инкорпорированных в прозрачную полимерную матрицу, рассматриваются вопросы формирования прозрачных электродов на основе графена [4] и углеродных нанотрубок [5].

Переход к полимерным носителям предусматривает снижение температуры используемых технологических процессов до 100–150°C, в зависимости от температуры деструкции используемого полимера. При этом сохраняются требования к характеристикам слоёв, на уровне значений, достигнутых при более высоких температурах синтеза. В последние годы особый интерес проявляется к аморфным оксидным материалам. Так, разработанный фирмой Sharp аморфный прозрачный материал канала активноматричных транзисторных структур на основе системы оксидов индия, галлия и цинка (In-Ga-Zn-O, IGZO) успешно используется в OLED-дисплеях (organic light-emitting diode) [6]. Дальнейшие работы по совершенствованию состава, структуры и технологии формирования каналов МДП-транзисторов привели к созданию нового материала IGZTO (In-Ga-Zn-Sn-O) с полевой подвижностью до  $65 \text{ см}^2\text{В}^{-1}\text{с}^{-1}$  [7].

Поиски путей совершенствования характеристик прозрачных электродов для систем отображения информации привели к созданию нового класса функциональных слоёв на основе многослойных тонкоплёночных структур различной архитектуры. В частности активизируются попытки создания новых функциональных слоёв для прозрачной электроники на основе сверхрешёток, трёхслойных структур типа оксид/металл/оксид, многослойных структур с пространственным разнесением областей с высокой концентрацией свободных носителей заряда и областей с высокой их подвижностью [8]. В сочетании с использованием аморфных оксидных материалов данное направление представляется весьма перспективным.

В настоящее время трёхслойные структуры на основе системы ИТО/Ag/ИТО широко используются при формировании прозрачных электродов в OLED-дисплеях, различных светоизлучающих структурах [9; 10].

Настоящая работа посвящена изучению процессов формирования, структуры и свойств оксидных многослойных тонкоплёночных структур на основе чередующихся слоёв нелегированного и легированного алюминием оксида цинка в зависимости от толщины единичных слоёв и температуры синтеза.

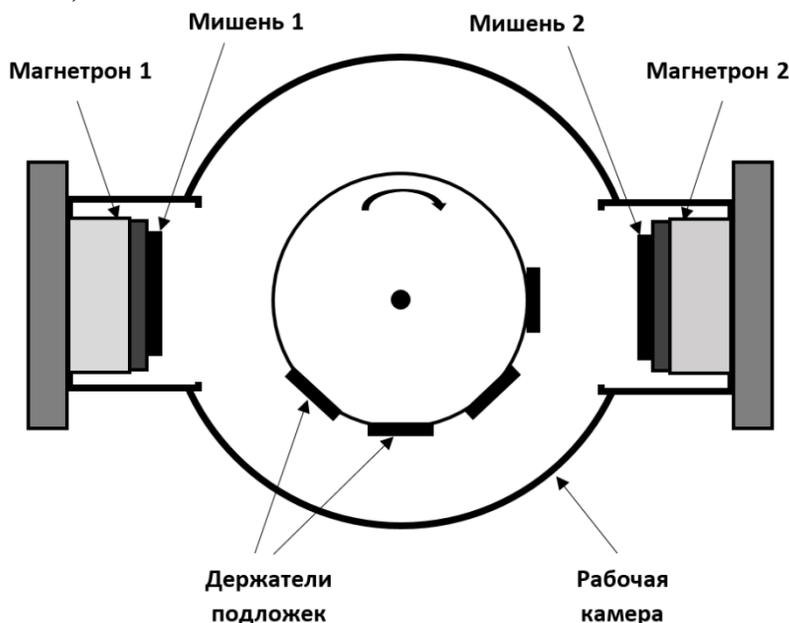
### Эксперимент

Все рассматриваемые слои были получены на установке магнетронного распыления, оснащённой многопозиционным узлом нагрева подложек барабанного типа с индивидуальным заданием температуры каждого держателя подложек и двумя распылительными магнетронами, установленными в патрубках вертикальной цилиндрической рабочей камеры диаметрально по отношению к барабану с подложками (рис. 1).

Для осаждения слоёв использовались керамические мишени чистого ZnO и ZnO, легированного алюминием на уровне 3 ат. % (далее AZO), диаметром 51 мм и толщиной 4 мм, полученные путём искрового плазменного спекания субмикронных порошковых смесей оксида цинка и оксида алюминия [11].

Перед началом распыления рабочая камера откачивалась до остаточного давления  $2 \times 10^{-4}$  Па. Распыление проводилось в атмосфере аргона (5N) при давлении

в камере 0.3 Па на постоянном токе в режиме стабилизации тока ( $I = 120$  мА). Расход газа в процессе распыления был стабилизирован на уровне 30 ст. см<sup>3</sup>/мин. В качестве подложек на каждый держатель были установлены по одной пластине размерами 25×26×1.1 мм из боросиликатного стекла и по одной термически окисленной с поверхности кремниевой пластине размерами 25×10×0.5 мм (тонкоплёночные образцы, выращенные на кремниевой подложке, использовались в дальнейшем для измерения толщины осаждённых плёнок методом растровой электронной микроскопии). Перед началом осаждения проводилось предварительное распыление каждой мишени на заслонку в течение 5 минут. Осаждение слоёв проводилось в едином цикле на подложки с разной температурой: 50, 100, 200 и 300 °С [12]. Минимальное расстояние от мишени до подложки составляло 100 мм, а длительность процесса осаждения – 200 минут. Скорость вращения барабана при осаждении одиночных слоёв ZnO и AZO составляла 10 об/мин, а при осаждении многослойных структур устанавливалась из расчёта обеспечения формирования заданной архитектуры многослойной структуры  $n \times (\text{AZO}/\text{ZnO})$ .



**Рис. 1 / Fig. 1.** Схема взаимного расположения магнетронов и подложек в рабочей камере / Schematic of the mutual arrangement of magnetrons and substrates in the working chamber

Источник: данные авторов

Варьированием скорости вращения барабана от 0,01 до 0,25 об/мин при одновременном распылении обеих мишеней в течение 200 минут были синтезированы многослойные структуры, состоящие из 2 пар слоёв AZO и ZnO ( $2 \times (\text{AZO}/\text{ZnO})$ ), 10 пар ( $10 \times (\text{AZO}/\text{ZnO})$ ) и 50 пар ( $50 \times (\text{AZO}/\text{ZnO})$ ), в которых

толщина единичных слоёв, составляющих структуру, уменьшалась с увеличением скорости вращения барабана.

Далее были проведены сравнительные исследования электрических и оптических характеристик плёнок ZnO, AZO и многослойных структур на их основе. Полученные результаты были сопоставлены с результатами исследования микроструктуры синтезированных тонкоплёночных образцов.

Данные по электрическим характеристикам слоёв и многослойных тонкоплёночных структур были получены путём измерения эффекта Холла в геометрии Ван дер Пау. Данные по оптическому пропусканию слоёв были получены на спектрофотометре UV3600 (Shimadzu, Япония). Рентгеноструктурные исследования проводились с помощью дифрактометра Shimadzu XRD-7000 с источником CuK $\alpha$  (Япония). Морфология поверхности и сколов слоёв исследовалась с помощью растрового электронного микроскопа LEO 1450 (Carl Zeiss, Германия).

### Обсуждение полученных результатов

В табл. 1 приведены данные по толщинам  $d$  и электрическим характеристикам (поверхностному сопротивлению  $R$ , удельному сопротивлению  $\rho$ , концентрации свободных носителей заряда  $n$  и их холловской подвижности  $\mu$ ) слоёв и многослойных структур, синтезированных при температурах 200 и 300 °С.

Таблица 1 / Table 1

#### Электрические характеристики слоёв и многослойных структур / Electrical characteristics of layers and multilayer structures

Тонкоплёночная структура	Температура подложки, °С	$d$ , нм	$R$ , Ом/кв	$\rho$ , $10^{-4}$ Ом·см	$\mu$ , $\text{см}^2\text{В}^{-1}\text{с}^{-1}$	$n$ , $10^{20} \text{ см}^{-3}$
ZnO	200	256	89300	22860	0.85	0.032
	300	240	24400	5856	2.93	0.036
AZO	200	440	21	9.2	16.01	4.23
	300	420	8.6	3.6	22.41	7.75
2×(AZO/ZnO)	200	420	410	172.2	3.95	0.98
	300	400	33	13.2	16.34	2.90
10×(AZO/ZnO)	200	277	374	103.6	5.13	1.22
	300	270	230	62.2	5.96	1.69
50×(AZO/ZnO)	200	300	242	72.6	5.45	1.58
	300	290	196	56.8	5.77	1.91

Источник: данные авторов

Можно видеть, что нелегированные слои характеризуются относительно высоким удельным сопротивлением, причём с ростом температуры синтеза удельное сопротивление снижается в основном за счёт увеличения подвижности носителей заряда. Легирование алюминием приводит к росту и концентрации носителей заряда и их подвижности и как следствие к существенному снижению

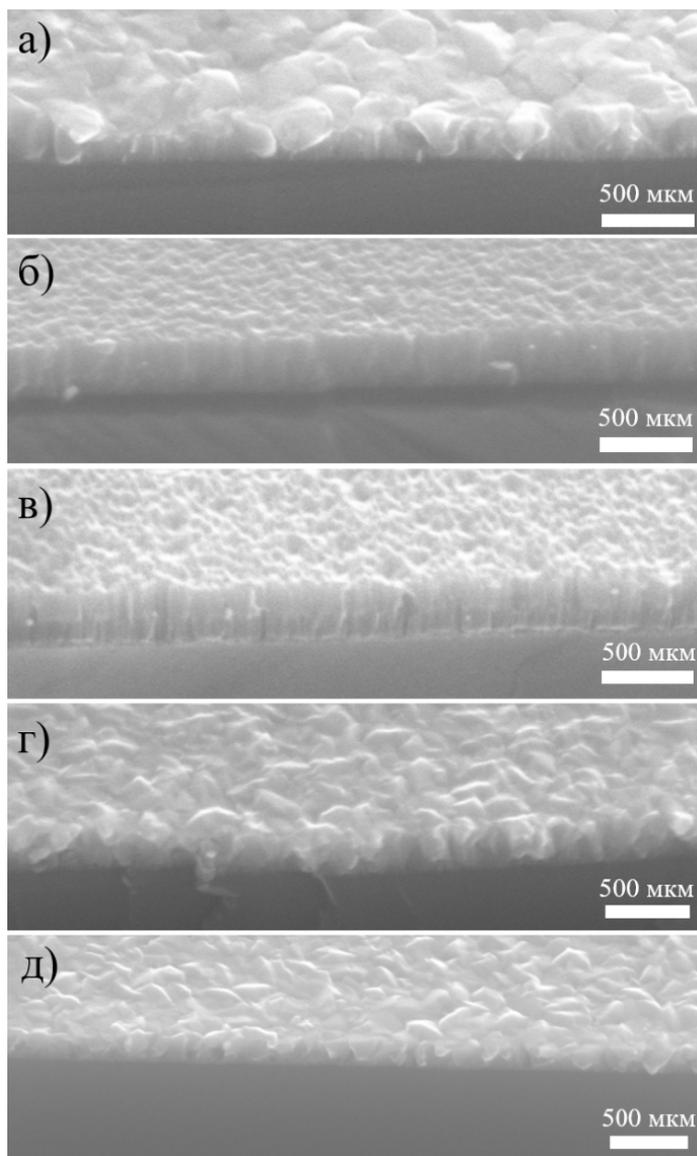
сопротивления [13]. С ростом температуры синтеза с  $200^{\circ}\text{C}$  до  $300^{\circ}\text{C}$  в слоях, легированных алюминием, наблюдается резкое (почти в 3 раза) снижение сопротивления, обусловленное ростом как концентрации носителей заряда, так и их подвижности.

Многослойная структура  $2\times(\text{AZO}/\text{ZnO})$ , осаждённая при температуре подложки  $300^{\circ}\text{C}$ , сохраняет электрические характеристики близкие к характеристикам слоёв AZO (с учётом меньшей суммарной толщины более проводящих прослоек AZO). Увеличение числа пар до 10 приводит к более существенному снижению электропроводности и подвижности. При дальнейшем увеличении числа пар сопротивление остаётся практически неизменным. Такое поведение обусловлено тем, что при магнетронном синтезе слоёв на основе оксида цинка на начальном этапе роста формируется сильно разупорядоченный пористый нанокристаллический подслой, существенно снижающий электрические характеристики [14].

На рис. 2 приведены изображения поверхностей и поперечных сколов синтезированных слоёв и многослойных структур. Приведённые изображения свидетельствуют о морфологии, типичной для слоёв ZnO, синтезированных методом магнетронного распыления. Все слои и структуры имеют столбчатую структуру, характерную для магнетронных слоёв на основе оксида цинка.

В то же время рельеф поверхности слоёв AZO и структуры  $2\times(\text{AZO}/\text{ZnO})$  существенно ниже, что свидетельствует о более высокой плотности зародышей и ранней их коалесценции, обусловленной тем, что здесь в качестве зародышей выступают не только атомы цинка, но и атомы алюминия, реиспарение которых с поверхности роста при данных температурах существенно меньше. В пользу такого механизма зарождения и роста слоёв свидетельствует и разница толщин слоёв ZnO и AZO, полученных в идентичных условиях (см. табл. 1).

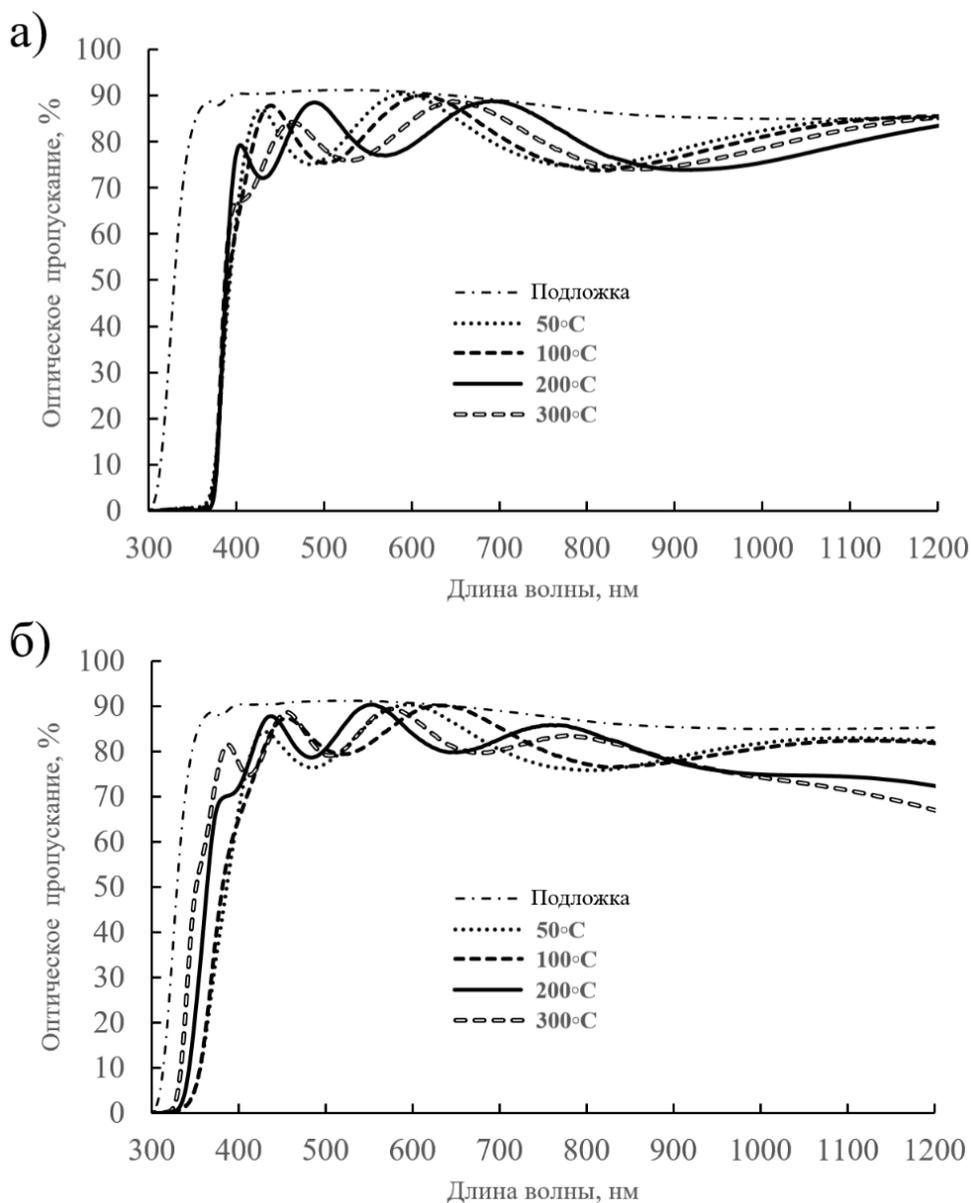
При дальнейшем увеличении числа пар слоёв морфология поверхности многослойной структуры становится ближе к морфологии слоёв нелегированного оксида цинка. Это связано с тем, что при увеличении числа пар слоёв до 10 и соответствующем снижении толщины единичных слоёв до 15 нм, что сравнимо с толщиной накристаллического подслоя, характерного для магнетронных слоёв на основе оксида цинка, в пределах первого слоя AZO не происходит полной коалесценции зародышей с формированием плотной сплошной плёнки. При дальнейшем переходе к распылению мишени из нелегированного оксида цинка осаждение атомов цинка происходит преимущественно на поверхности сформированных трёхмерных зародышей что способствует увеличению рельефа поверхности. Таким образом, для получения плотной многослойной структуры с гладкой морфологией поверхности и чёткими металлургическими границами единичных слоёв необходимо обеспечить раннюю коалесценцию зародышей.



**Рис. 2 / Fig. 2.** Микрофотографии слоёв ZnO (а), AZO (б) и многослойных структур  $2\times(\text{AZO}/\text{ZnO})$  (в),  $10\times(\text{AZO}/\text{ZnO})$  (г) и  $50\times(\text{AZO}/\text{ZnO})$  (д), синтезированных при  $300^\circ\text{C}$  / Micrographs of ZnO (a), AZO (б) layers and multilayer structures  $2=(\text{AZO}/\text{ZnO})$  (в),  $10=(\text{ASA}/\text{No})$  (г) and  $50=(\text{ASO}/\text{No})$  (д) synthesized at  $300^\circ\text{C}$

Источник: данные авторов

Спектры оптического пропускания одиночных слоёв ZnO и AZO, синтезированных в диапазоне температур  $50 \div 300^\circ\text{C}$  приведены на рис. 3.



**Рис. 3 / Fig. 3.** Спектры оптического пропускания слоёв ZnO (а) и AZO (б), синтезированных в интервале температур подложек от 50 до 300 °С / Optical transmission spectra of ZnO (а) and AZO (б) layers synthesized in the temperature range of substrates from 50 to 300 °С

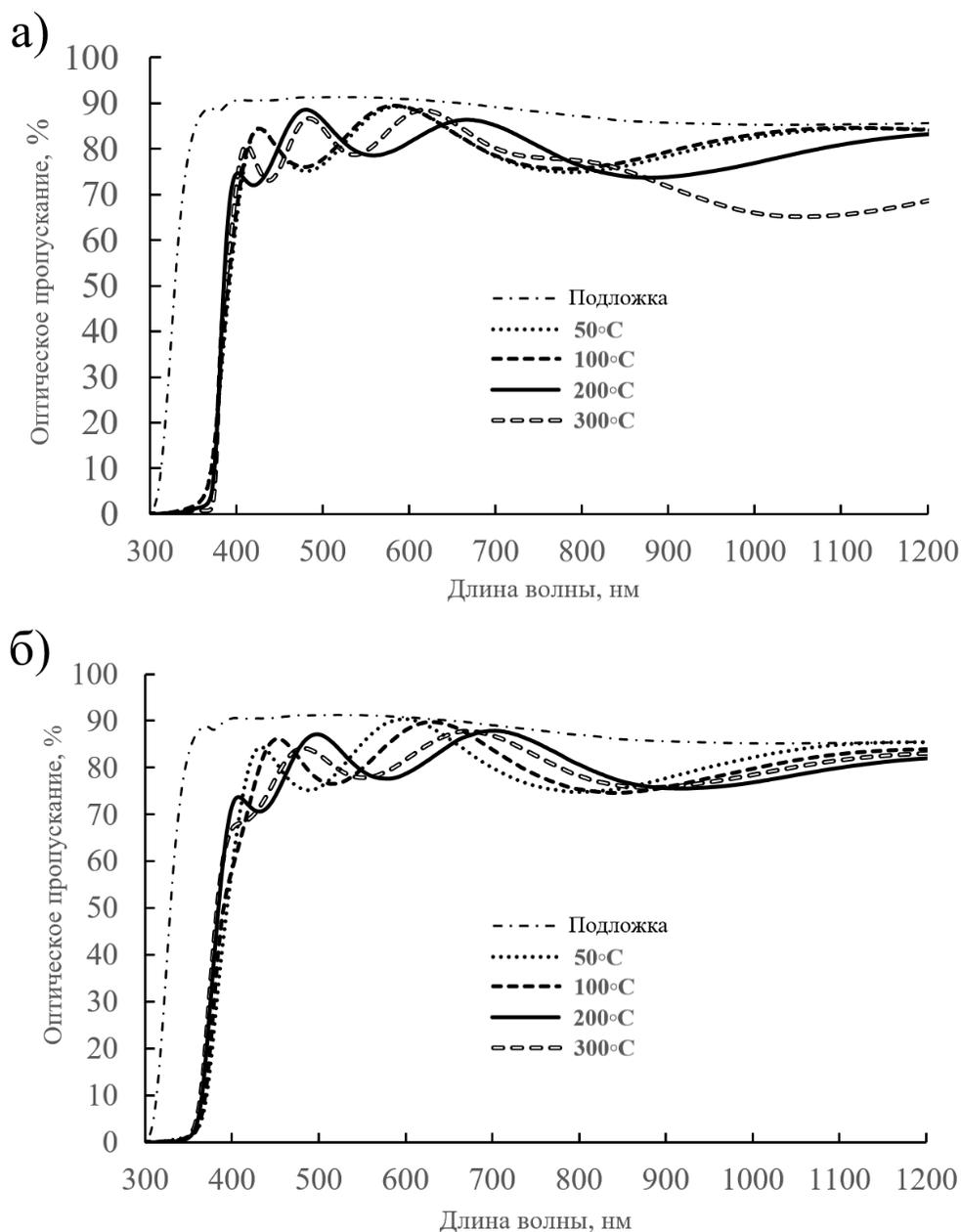
Источник: данные авторов

Можно видеть, что спектры нелегированных слоёв ZnO, синтезированных при различных температурах, не обнаруживают сколь-нибудь значимых различий в положении края поглощения и величине оптического пропускания в ближней ИК-области. Эти данные хорошо согласуются с результатами измерения электрических характеристик слоёв (табл. 1), где показано, что слои нелегированного оксида цинка характеризуются относительно низкой концентрацией свободных носителей заряда, мало зависящей от температуры синтеза. В слоях AZO с ростом температуры синтеза возрастает концентрация свободных носителей в связи с ростом степени ионизации примеси и увеличением плотности кислородных вакансий. При этом наблюдается коротковолновое смещение края собственного поглощения, обусловленное эффектом Бурштейна-Мосса, и снижение оптического пропускания в ближней ИК области вследствие увеличения отражения электромагнитного излучения на свободных электронах.

На рис. 4 приведены спектры оптического пропускания многослойных структур, состоящих из 2 и 50 пар слоёв, синтезированных при температурах от 50 до 300 °С.

В структурах, состоящих из двух пар слоёв, с ростом температуры синтеза наблюдается разнонаправленное поведение кривых оптического пропускания. При низких температурах синтеза наблюдается незначительное коротковолновое смещение края поглощения, а при 300 °С край поглощения смещается вправо, в то время как ИК отражение на свободных электронах растёт. Мы полагаем, что такое поведение может быть обусловлено структурными изменениями в области межслоевых интерфейсов.

Средние величины оптического пропускания без вычета потерь на стекле в спектральном диапазоне 400 ÷ 700 нм приведены в табл. 2. Все синтезированные слои и структуры имеют достаточно высокую прозрачность в видимом диапазоне спектра. Максимум пропускания (84,12%) достигается в слоях AZO в основном за счёт коротковолнового сдвига края фундаментального поглощения.



**Рис. 4 / Fig. 4.** Спектры оптического пропускания многослойных структур  $2 \times (\text{AZO}/\text{ZnO})$  (а) и  $50 \times (\text{AZO}/\text{ZnO})$  (б), синтезированных в интервале температур подложек от 50 до 300 °С / Optical transmission spectra of multilayer structures  $2 \times (\text{AZO}/\text{ZnO})$  (а) and  $50 \times (\text{AZO}/\text{ZnO})$  (б) synthesized in the temperature range of substrates from 50 to 300 °С

Источник: данные авторов

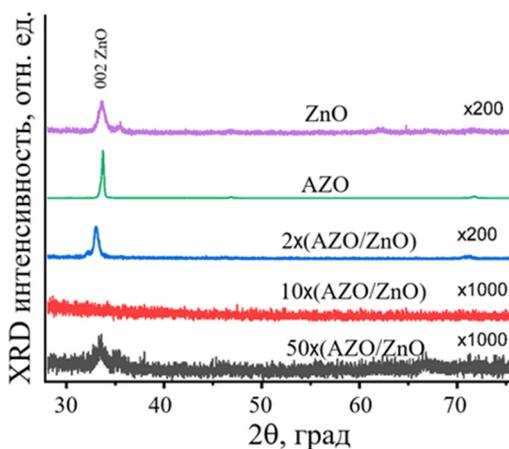
Таблица 2 / Table 2

**Средний коэффициент оптического пропускания в видимой области спектра в одиночных слоях и многослойных структурах, синтезированных при различной температуре подложек / Average optical transmission coefficient in the visible region of the spectrum in single layers and multilayer structures synthesized at different substrate temperatures**

Тонкоплёночная структура	Средний коэффициент оптического пропускания в видимой области (400–700 нм), %			
	T = 50°C	T = 100°C	T = 200°C	T = 300°C
ZnO	83,11	82,98	81,92	81,16
AZO	83,46	84,12	83,30	83,09
2×(AZO/ZnO)	82,26	82,58	82,06	82,31
10×(AZO/ZnO)	81,27	83,17	81,75	83,47
50×(AZO/ZnO)	82,57	82,44	80,70	80,73

Источник: данные авторов

Спектры рентгеновской дифракции в одиночных слоях и многослойных структурах, синтезированных при 200 °С, приведены на рис. 5. Можно видеть, что одиночные слои и тонкоплёночная структура 2×(AZO/ZnO) имеют ярко выраженную текстуру с ориентацией оси *c* кристаллитов ZnO по нормали к поверхности роста, причём максимальная интенсивность рефлекса 002 ZnO наблюдается в слоях AZO. Влияние алюминия на структуру слоёв оксида цинка детально обсуждается в [13; 15; 16]. Увеличение числа пар слоёв в тонкоплёночных периодических структурах до 10 приводит к более раннему прерыванию ориентированного роста кристаллитов и, как следствие, к снижению их кристалличности вплоть до полной аморфизации.



**Рис. 5 / Fig. 5.** Дифрактограммы слоёв ZnO, AZO и многослойных тонкоплёночных структур, синтезированных при температуре подложки 200 °С / Diffractograms of ZnO, AZO layers and multilayer thin-film structures synthesized at a substrate temperature of 200 °С

Источник: данные авторов

При дальнейшем увеличении числа пар слоёв до 50 в спектрах рентгеновской дифракции снова появляется незначительный рефлекс 002 ZnO. Такая трансформация структуры обусловлена тем, что при увеличении числа пар слоёв до 50 расчётная толщина единичных слоёв снижается до 3 нм, что с учётом значительной длины диффузии осаждаемых атомов при 200°С приводит практически к полному перемешиванию системы с устранением межслоевых границ. При этом механизм роста слоёв становится близким механизму роста, имеющему место при распылении одной мишени AZO, содержащей ~ 1,5 ат.% алюминия.

### Заключение

Изучение процессов магнетронного синтеза многослойных периодических структур на основе чередующихся слоёв легированного оксида цинка и оксида цинка, легированного алюминием на уровне 3 ат.%, а также структуры и свойств полученных плёнок показало следующее:

1. При фиксированном объёме базового материала (ZnO) и количества легирующей примеси (Al) увеличение числа пар слоёв приводит к более раннему прерыванию ориентированного роста кристаллитов оксида цинка и, как следствие, к снижению кристаллического совершенства многослойной тонкоплёночной структуры, вплоть до полной её аморфизации при 10 парах слоёв. Порог аморфизации лежит в области толщин 10 ÷ 15 нм. В аморфных структурах, состоящих из 10 пар слоёв, наблюдается также существенное снижение проводимости, обусловленное ростом сопротивления межслоевых интерфейсов.

2. Дальнейшее увеличение числа пар слоёв до 50 приводит практически полному перемешиванию системы с устранением межслоевых границ. При этом механизм роста слоёв становится близким механизму роста, имеющему место при распылении одной мишени AZO, содержащей 1.5 ат.% алюминия.

3. Для получения многослойной тонкоплёночной структуры с минимальным рельефом поверхности и чёткими металлургическими границами единичных слоёв необходимо обеспечить условия для максимально ранней коалесценции зародышей.

*Статья поступила в редакцию 15.08.2022 г.*

### ЛИТЕРАТУРА

1. Research on flexible display at Ulsan National Institute of Science and Technology / Park J., Heo S., Park K., Song M. H., Kim J.-Y., Kyung G., Ruoff R. S., Park J.-U., Bien F. // *nj Flex. Electron.* 2017. Vol. 1. Iss. 9. DOI: 10.1038/s41528-017-0006-9 [Электронный ресурс]. URL: <https://www.nature.com/articles/s41528-017-0006-9#citeas> (дата обращения: 07.07.2022).
2. Transparent conducting oxide films for various applications: a review / Afre R. A., Sharma N., Sharon M., Sharon M. // *Reviews on advanced materials science.* 2018. Vol. 53. Iss. 1. P. 79–89. DOI: 10.1515/rams-2018-0006.
3. Handbook of Transparent Conductors / eds. Ginley D. S., Hosono H., Paine D. C. New York, London: Springer Science & Business Media, 2010. 534 p.

4. Synthesis and Characterization of Graphene Oxide and Reduced Graphene Oxide Thin Films Deposited by Spray Pyrolysis Method / Eluyemi M. S., Eleruja M. A., Adedeji A. V., Olofinjana B., Fasakin O., Akinwunmi O. O., Ilori O. O., Famojuro A. T., Ayinde S. A., Ajayi E. O. B. // *Graphene*. 2016. Vol. 5. No. 3. P. 143–154. DOI: 10.4236/graphene.2016.53012.
5. Zhou Y., Azumi R. Carbon nanotube based transparent conductive films: progress, challenges, and perspectives // *Science and Technology of Advanced Materials*. 2016. Vol. 17. Iss. 1. P. 493–516. DOI: 10.1080/14686996.2016.1214526.
6. Robust Gate Driver on Array Based on Amorphous IGZO Thin-Film Transistor for Large Size High-Resolution Liquid Crystal Displays / Ma Q., Wang H.-H., Zhou L., Fan J., Liao C., Guo X., Zhang S. // *IEEE Journal of the Electron Devices Society*. 2019. Vol. 7. P. 717–721. DOI: 10.1109/JEDS.2019.2919677.
7. Yang T.-T., Kuo D.-H., Tang K.-P. n-type Sn substitution in amorphous IGZO film by sol-gel method: A promoter of hall mobility up to  $65 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$  // *Journal of Non-Crystalline Solids*. 2021. Vol. 553. P. 120503. DOI: 10.1016/j.jnoncrysol.2020.120503.
8. Jiang H. X., Lin J. Y. Semiconductor superlattices with periodic disorder // *Journal of Applied Physics*. 1984. Vol. 63. Iss. 6. P. 1984–1989. DOI: 10.1063/1.341098.
9. Flexible transparent conducting electrodes based on metal meshes for organic optoelectronic device applications: a review / Lee H. B., Jin W. Y., Ovhal M. M., Kumar N., Kang J. W. // *Journal of Materials Chemistry C*. 2019. Vol. 7. Iss. 5. P. 1087–1110. DOI: 10.1039/c8tc04423F.
10. ITO/Ag/ITO multilayer-based transparent conductive electrodes for ultraviolet light-emitting diodes / Lee J. H., Woo K. Y., Kim K. H., Kim H.-D., Kim T. G. // *Optics Letters*. 2013. Vol. 38. Iss. 23. P. 5055–5058. DOI: 10.1364/OL.38.005055.
11. A Laboratory Apparatus for Spark Plasma Sintering of Ceramic and Composite Materials / Asvarov A. Sh., Muslimov A. E., Akhmedov A. K., Abduev A. Kh., Kanevsky V. M. // *Instruments and Experimental Techniques*. 2019. Vol. 62. Iss. 5. P. 726–730. DOI: 10.1134/S0020441219050038.
12. A Multi-Position Drum-Type Assembly for Simultaneous Film Deposition at Different Temperatures in a Single Sputter Cycle-Application to ITO Thin Films / Akhmedov A. K., Asvarov A. S., Muslimov A. E., Kanevsky V. M. // *Coatings*. 2020. Vol. 10. № 11. P. 1076. DOI: 10.3390/coatings10111076.
13. Maldonado F., Stashans A. Al-doped ZnO: Electronic, electrical and structural properties // *Journal of Physics and Chemistry of Solids*. 2010. Vol. 71. Iss. 5. P. 784–787. DOI: 10.1016/j.jpcs.2010.02.001.
14. A Revised Growth Model for Transparent Conducting Ga Doped ZnO Films: Improving Crystallinity by Means of Buffer Layers / Abduev A., Akmedov A., Asvarov A., Chiolerio A. // *Plasma Processes and Polymers*. 2015. Vol. 12. Iss. 8. P. 725–733. DOI: 10.1002/ppap.201400230.
15. Gulpepe O., Atay F. The effect of Al element on structural, optical, electrical, surface and photocatalytic properties of Sol-gel derived ZnO films // *Applied Physics A*. 2022. Vol. 128. No. 25. DOI: 10.1007/s00339-021-05173-6.
16. Aydemir S., Karakaya S. The effect of Al on structure, morphology and optical properties of network texture ZnO thin films synthesized using the sol-gel method // *Optik*. 2015. Vol. 126. Iss. 18. P. 1735–1739. DOI: 10.1016/j.ijleo.2015.04.055.

## REFERENCES

1. Park J., Heo S., Park K., Song M. H., Kim J.-Y., Kyung G., Ruoff R. S., Park J.-U., Bien F. Research on flexible display at Ulsan National Institute of Science and Technology. In: *npj Flex. Electron*, 2017, vol. 1, iss. 9. DOI: 10.1038/s41528-017-0006-9. Available at: <https://www.nature.com/articles/s41528-017-0006-9#citeas> (accessed: 07.07.2022).
2. Afre R. A., Sharma N., Sharon M., Sharon M. Transparent conducting oxide films for various applications: a review. In: *Reviews on advanced materials science*, 2018, vol. 53, iss. 1, pp. 79–89. DOI: 10.1515/rams-2018-0006.
3. Ginley D. S., Hosono H., Paine D. C., eds. *Handbook of Transparent Conductors*. New York, London, Springer Science & Business Media, 2010. 534 p.
4. Eluyemi M. S., Eleruja M. A., Adedeji A. V., Olofinjana B., Fasakin O., Akinwunmi O. O., Ilori O. O., Famojuro A. T., Ayinde S. A., Ajayi E. O. B. Synthesis and Characterization of Graphene Oxide and Reduced Graphene Oxide Thin Films Deposited by Spray Pyrolysis Method. In: *Graphene*, 2016, vol. 5, no. 3, pp. 143–154. DOI: 10.4236/graphene.2016.53012.
5. Zhou Y., Azumi R. Carbon nanotube based transparent conductive films: progress, challenges, and perspectives. In: *Science and Technology of Advanced Materials*, 2016, vol. 17, iss. 1, pp. 493–516. DOI: 10.1080/14686996.2016.1214526.
6. Ma Q., Wang H.-H., Zhou L., Fan J., Liao C., Guo X., Zhang S. Robust Gate Driver on Array Based on Amorphous IGZO Thin-Film Transistor for Large Size High-Resolution Liquid Crystal Displays. In: *IEEE Journal of the Electron Devices Society*, 2019, vol. 7, pp. 717–721. DOI: 10.1109/JEDS.2019.2919677.
7. Yang T.-T., Kuo D.-H., Tang K.-P. n-type Sn substitution in amorphous IGZO film by sol-gel method: A promoter of hall mobility up to 65 cm<sup>2</sup>/V·s. In: *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2021, vol. 553, pp. 120503. DOI: 10.1016/j.jnoncrysol.2020.120503.
8. Jiang H. X., Lin J. Y. Semiconductor superlattices with periodic disorder. In: *Journal of Applied Physics*, 1984, vol. 63, iss. 6, pp. 1984–1989. DOI: 10.1063/1.341098.
9. Lee H. B., Jin W. Y., Ovhal M. M., Kumar N., Kang J. W. Flexible transparent conducting electrodes based on metal meshes for organic optoelectronic device applications: a review. In: *Journal of Materials Chemistry C*, 2019, vol. 7, iss. 5, pp. 1087–1110. DOI: 10.1039/c8tc04423F.
10. Lee J. H., Woo K. Y., Kim K. H., Kim H.-D., Kim T. G. ITO/Ag/ITO multilayer-based transparent conductive electrodes for ultraviolet light-emitting diodes. In: *Optics Letters*, 2013, vol. 38, iss. 23, pp. 5055–5058. DOI: 10.1364/OL.38.005055.
11. Asvarov A. Sh., Muslimov A. E., Akhmedov A. K., Abduv A. Kh., Kanevsky V. M. A Laboratory Apparatus for Spark Plasma Sintering of Ceramic and Composite Materials. In: *Instruments and Experimental Techniques*, 2019, vol. 62, iss. 5, pp. 726–730. DOI: 10.1134/S0020441219050038.
12. Akhmedov A. K., Asvarov A. S., Muslimov A. E., Kanevsky V. M. A Multi-Position Drum-Type Assembly for Simultaneous Film Deposition at Different Temperatures in a Single Sputter Cycle-Application to ITO Thin Films. In: *Coatings*, 2020, vol. 10, no. 11, pp. 1076. DOI: 10.3390/coatings10111076.
13. Maldonado F., Stashans A. Al-doped ZnO: Electronic, electrical and structural properties. In: *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 2010, vol. 71, iss. 5, pp. 784–787. DOI: 10.1016/j.jpcs.2010.02.001.
14. Abduv A., Akmedov A., Asvarov A., Chiolerio A. A Revised Growth Model for Transparent Conducting Ga Doped ZnO Films: Improving Crystallinity by Means of Buffer Layers. In: *Plasma Processes and Polymers*, 2015, vol. 12, iss. 8, pp. 725–733. DOI: 10.1002/ppap.201400230.

15. Gultepe O., Atay F. The effect of Al element on structural, optical, electrical, surface and photocatalytic properties of Sol-gel derived ZnO films. In: *Applied Physics A*, 2022, vol. 128, no. 25. DOI: 10.1007/s00339-021-05173-6.
16. Aydemir S., Karakaya S. The effect of Al on structure, morphology and optical properties of network texture ZnO thin films synthesized using the sol-gel method. In: *Optik*, 2015, vol. 126, iss. 18, pp. 1735–1739. DOI: 10.1016/j.ijleo.2015.04.055.

---

### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

*Абдуев Аслан Хаджимуратович* – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры нанотехнологий и микросистемной техники Инженерной академии Российского университета дружбы народов; старший научный сотрудник учебно-научной лаборатории теоретической и прикладной нанотехнологии Московского государственного областного университета;  
e-mail: a\_abduev@mail.ru;

*Ахмедов Ахмед Кадиевич* – кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Института физики им. Х. И. Амирханова Дагестанского федерального исследовательского центра Российской академии наук;  
e-mail: a-akhmed@mail.ru;

*Мурлиев Эльдар Камильевич* – младший научный сотрудник Института физики им. Х. И. Амирханова Дагестанского федерального исследовательского центра Российской академии наук;  
e-mail: cht-if-ran@mail.ru;

*Беляев Виктор Васильевич* – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры фундаментальной физики и нанотехнологии Московского государственного областного университета; профессор кафедры нанотехнологий и микросистемной техники Инженерной академии Российского университета дружбы народов;  
e-mail: vv.belyaev@mgou.ru;

*Асваров Абил Шамсудинович* – кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Института физики им. Х. И. Амирханова Дагестанского федерального исследовательского центра Российской академии наук;  
e-mail: abil-as@list.ru;

*Фрах Махасин Али Абделрахман* – аспирант кафедры нанотехнологий и микросистемной техники Российского университета дружбы народов;  
e-mail: sounak\_ali@yahoo.com, 1042165106@rudn.ru

### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*Aslan Kh. Abduev* – Cand. Sci. (Phys.-Math.), Assoc. Prof., Department of Nanotechnologies and Microsystem Technology, Engineering Academy, RUDN University (Peoples' Friendship University of Russia); Senior Researcher, Educational and Scientific Laboratory of Theoretical and Applied Nanotechnology, Moscow Region State University;  
e-mail: a\_abduev@mail.ru;

*Akhmed K. Akhmedov* – Cand. Sci. (Phys.-Math.), Leading Researcher, Institute of Physics of the Daghestan Federal Scientific Center of the Russian Academy of Sciences;  
e-mail: a-akhmed@mail.ru;

*Eldar K. Murliev* – Research Assistant, Institute of Physics of the Daghestan Federal Scientific Center of the Russian Academy of Sciences;  
e-mail: cht-if-ran@mail.ru;

*Victor V. Belyaev* – Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Department of Fundamental Physics and Nanotechnology, Moscow Region State University; Prof., Department of Nanotechnologies and Microsystem Technology, Engineering Academy, RUDN University (Peoples' Friendship University of Russia);  
e-mail: vv.belyaev@mgou.ru;

*Abil Sh. Asvarov* – Cand. Sci. (Phys.-Math.), Leading Researcher, Institute of Physics of the Daghestan Federal Scientific Center of the Russian Academy of Sciences;  
e-mail: abil-as@list.ru;

*Mahasin Ali Abdelrahman Frah* – Postgraduate Student, Department of Nanotechnologies and Microsystem Technology, RUDN University (Peoples' Friendship University of Russia);  
e-mail: sounak\_ali@yahoo.com, 1042165106@rudn.ru

---

### ПРАВИЛЬНАЯ ССЫЛКА НА СТАТЬЮ

Синтез многослойных структур на основе оксида цинка с периодической пространственной локализацией донорной примеси / Абдуев А. Х., Ахмедов А. К., Мурлиев Э. К., Беляев В. В., Асваров А. Ш., Фрах М. А. А. // Вестник Московского государственного областного университета. Серия: Физика-Математика. 2022. № 3. С. 58-73.  
DOI: 10.18384/2310-7251-2022-3-58-73

### FOR CITATION

Abduev A. Kh., Akhmedov A. K., Murliev E. K., Belyev V. V., Asvarov A. Sh., Frah M. A. A. Synthesis of ZnO-based multilayer structures with periodic spatial localization of a donor impurity. In: *Bulletin of the Moscow Region State University. Series: Physics and Mathematics*, 2022, no. 3, pp. 58–73.  
DOI: 10.18384/2310-7251-2022-3-58-73