

СИНТЕЗ, ИССЛЕДОВАНИЕ И НЕЙРОСЕТЕВОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СВОЙСТВ ЗОЛЬ-ГЕЛЬ СТРУКТУР ИТО/ZnO и ИТО/ZnO:Mg

Г.Е. АЙВАЗЯН^{1*}, К.Д. ДАНИЛЬЧЕНКО², Д.Л. КОВАЛЕНКО²,
А.А. МАЕВСКИЙ², Ю.В. НИКИТЮК², В.А. ПРОХОРЕНКО²,
А.В. СЕМЧЕНКО², В.В. СИДСКИЙ², С.А. ХАХОМОВ²
В.В. МАЛЮТИНА-БРОНСКАЯ³, А.В. НЕСТЕРЕНКО³

¹Национальный политехнический университет Армении, Ереван, Армения

²Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины,
Гомель, Беларусь

³ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника», Минск, Беларусь

*e-mail: agagarm@gmail.com

(Поступила в редакцию 13 апреля 2023 г.)

Золь-гель методом изготовлены двуслойные структуры ИТО/ZnO и ИТО/ZnO:Mg и экспериментально исследованы их структурные и фотоэлектрические свойства. Показано, что морфология и ширина запрещенной зоны этих структур по сравнению с пленками ZnO и ZnO:Mg без подслоя ИТО заметно изменяется. Проанализированы ВАХ изготовленных структур в темноте и под воздействием оптического излучения разной длины волны. С использованием искусственных нейронных сетей смоделирована их спектральная фоточувствительность.

1. Введение

Оксид цинка (ZnO) – широкозонный полупроводник, обладающий уникальными электрофизическими и оптическими свойствами, высокой термической стабильностью, радиационной и химической стойкостью. Благодаря относительно высокому значению оптического пропускания и электропроводности пленки ZnO широко применяются в солнечных элементах в качестве контактных [1], пассивирующих [2] или транспортных слоев [3, 4]. Наличие фоточувствительности позволяет использовать этот материал также в светоизлучающих приборах, газовых и биологических сенсорах, детекторах ультрафиолетового, рентгеновского и гамма-излучений [5–8].

Один из возможных подходов варьирования оптических и электрофизических свойств пленок ZnO заключается в их легировании ионами переходных или редкоземельных металлов, такими как В, Al, Mg, Ca, Cd, Ga, Tb и Eu [1,9–11]. При этом важно, чтобы радиус легирующего элемента был приблизительно равен радиусу замещаемого элемента для обеспечения образования соединения с не-

большими искажениями кристаллической решетки. В этом аспекте наиболее подходящими являются пленки ZnO, легированные ионами магния (ZnO:Mg), поскольку радиус иона Mg^{2+} (0.57 Å) сравним с радиусом иона Zn^{2+} (0.60 Å) [12, 13].

Для изготовления пленок ZnO и их легирования примесями используются различные методы синтеза, такие как золь-гель [13, 14] и спрей-пиролиз [15] технологии, лазерное импульсное [16] и атомно-слоевое [2, 17] осаждение, магнетронное распыление на переменном токе [11, 18] и другие. Для каждого метода реализуются различные условия и режимы формирования пленок, что в конечном счете сказывается на их структуре и свойствах. Золь-гель метод имеет ряд преимуществ для промышленного применения, обусловленных простотой технологического процесса, низкой стоимостью используемого оборудования, широким набором применяемых реагентов и возможностью контроля стехиометричности пленок.

Ранее нами были исследованы структурные, оптические и фотоэлектрические свойства пленок ZnO и ZnO:Mg, осажденных золь-гель методом непосредственно на кремниевые или диэлектрические подложки [19]. Аналогичные исследования, в том числе в случае других методов синтеза пленок, проведены в работах [20–25]. Между тем, в различных фотоэлектронных приборах пленки ZnO часто применяются в сочетании с пленками оксид индия-олова ($In_2O_3:SnO_2$, ITO) [26–29]. Такие двуслойные структуры обладают многими превосходными свойствами, как, например, хорошая электропроводность, высокое оптическое пропускание, равномерное отражение в инфракрасном диапазоне. Кроме того, несоответствие решеток оборванных кислородных связей на плотно упакованных плоскостях ITO (111) и ZnO (001) очень мало (всего 3%). Однако, следует отметить, что структурные и фотоэлектрические свойства указанных двуслойных структур мало изучены.

В настоящей работе представлены результаты исследования различных свойств структур ITO/ZnO и ITO/ZnO:Mg, синтезированных с помощью золь-гель метода. Кроме того, были применены искусственные нейронные сети для прогнозирования их спектральной fotocувствительности.

2. Методика синтеза и измерений

В качестве исходных использовали стеклянные подложки, на которых золь-гель методом последовательно осаждали пленки ITO и ZnO или ZnO:Mg. Для получения золя ITO применяли ацетат индия (InAc) $[In(CH_3COO)_3]$, олово двуххлористое двухводное ($SnCl_2$) $[SnCl_2 \cdot 2H_2O]$ и этиловый спирт. Пленкообразующий раствор был приготовлен следующим образом: в одной пробирке смешивали InAc и $SnCl_2$, после чего компоненты растворяли в этиловом спирте. Для ускорения процесса растворения пробирку помещали в ультразвуковую ванну на 20 мин, после чего золь выдерживали в течение суток.

Пленки ZnO и ZnO:Mg были получены золь-гель методом с использованием раздельного гидролиза. В качестве исходных компонентов применяли дигидрат ацетата цинка (ZnAc) $[Zn(CH_3COO)_2 \cdot 2H_2O]$, ацетат магния ($Mg(CH_3COO)_2$), диэтаноламин (DEA) $[HOCH_2CH_2NHCH_2CH_2OH]$, изопропиловый спирт и дистиллированную воду. Для приготовления пленкообразующего раствора ZnAc и $Mg(CH_3COO)_2$ отдельно растворяли в изопропиловом спирте и перемешивали

при 60°C в течение 10 мин. Когда раствор трансформировался в эмульсию, в него добавляли DEA при молярном соотношении DEA/ZnAc 1:1 и H₂O/ZnAc 2:1, соответственно. Каждый золь выдерживали в течение суток. При синтезе пленок ZnO:Mg золи смешивали в соотношении 1:5.

Осаждение пленок производили центрифугированием со скоростью вращения 2000 об/мин в течение 40 с (вначале 5 слоев ITO и затем 5 слоев ZnO или ZnO:Mg), после чего сушили при 60°C в течение 10 мин. Окончательную термообработку производили при температуре 550°C в течение 60 мин. Толщина пленок ITO составляла порядка 400 нм, а пленок ZnO – 800 нм.

Измерение вольтамперных характеристик (ВАХ) проводили в темноте и под воздействием оптического излучения с использованием ртутных зондов. Схема измерения ВАХ представлена на рис.1. Оптический модуль измерительного комплекса включал в себя модуль позиционирования для размещения испытуемого образца и мультиспектральный источник лазерного излучения, состоящий из набора 9 лазерных диодов с длинами волн 405, 450, 520, 660, 780, 808, 905, 980 и 1064 нм с общим оптоволоконным выводом и с платами управления [19]. В качестве источника глубокого ультрафиолетового (УФ) излучения с длиной волны 278 нм использовали светодиод TO-3535BC-UVC265-30-6V-E, размещенный в специализированной оснастке. Все измерения были проведены с разверткой по напряжению от –10 до +10 В при комнатной температуре.

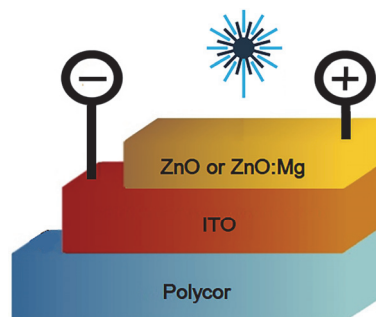


Рис.1. Схема измерения ВАХ структур.

Морфологию поверхностей пленок и поперечные сечения структур исследовали с помощью атомно-силового микроскопа (АСМ) SolverPro 47 и растрового электронного микроскопа (РЭМ) JEOL JSM-6610LV, соответственно. Для обработки полученных АСМ изображений использовали модульную программу Gwyddion. Спектры поглощения образцов определяли спектрофотометром Cary-50 (Varian, США), представляющем собой автоматизированную систему, обеспечивающую измерение, обработку и регистрацию выходной информации.

3. Результаты экспериментальных исследований и их обсуждение

Полученные двуслойные структуры обладали высокой адгезией к подложкам, были физически стабильными и не отслаивались при нагревании свыше 550°C. На рис.2 показаны РЭМ изображения поперечного сечения структур ITO/ZnO и ITO/ZnO:Mg, а на рис.3 приведены АСМ изображения их морфологии.

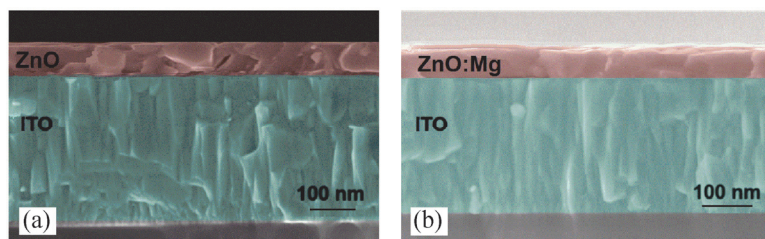


Рис.2. РЭМ изображения поперечного сечения структур (а) ITO/ZnO и (б) ITO/ZnO:Mg.

Из рис.2 видно, что верхняя пленка комфортно покрывает поверхность подслоя ITO, состоит из плотноупакованных пирамидальных кристаллитов с одинаковым направлением роста, перпендикулярным подложке. Вдоль плоскости пленки размеры кристаллитов отличаются. Поверхность полученных оксидных пленок характеризуется развитым рельефом с высокой степенью шероховатости и упаковкой кристаллитов по типу «муаровой» конфигурации (рис.3). Введение ионов Mg в пленку ZnO приводит к повышению значения перепада высот и увеличению размера частиц с 33 до 48 нм, что может быть результатом накопления частиц MgO на поверхности зерен ZnO. В сравнении с пленками ZnO и ZnO:Mg, синтезированными непосредственно на поверхности подложки (без подслоя ITO) [19], исследованные образцы имеют относительно гладкую морфологию. Известно, что осажденные пленки с определенной степенью сглаживания повторяют наноразмерную текстуру подложек [30]. Можно предположить, что в нашем случае подслей ITO заполняет неровности подложки и, тем самым, играет роль своеобразного сглаживающего буфера для пленок ZnO и ZnO:Mg. Немаловажен и тот факт, что оборванные кислородные связи на поверхности подслоя ITO способствуют первоначальному зарождению и последующему росту высококачественных пленок ZnO:Mg на подложке ITO [31, 32].

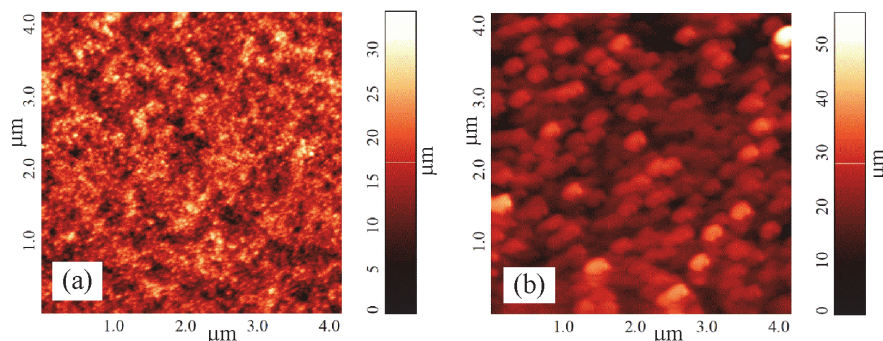


Рис.3. АСМ изображения поверхности пленок (а) ZnO и (б) ZnO:Mg.

Исследование спектров поглощения синтезированных пленок показало, что они характеризуются порогом пропускания света в интервале 350–400 нм и прозрачностью в видимом диапазоне 75–95%. На всех спектрах поглощения света при энергиях световых фотонов менее значений ширины запрещенной зоны наблюдается экспоненциальная полоса поглощения (полоса Урбаха). Исходя из этого по аппроксимации линейной части спектров поглощения определили численные значения ширины запрещенной зоны пленок.

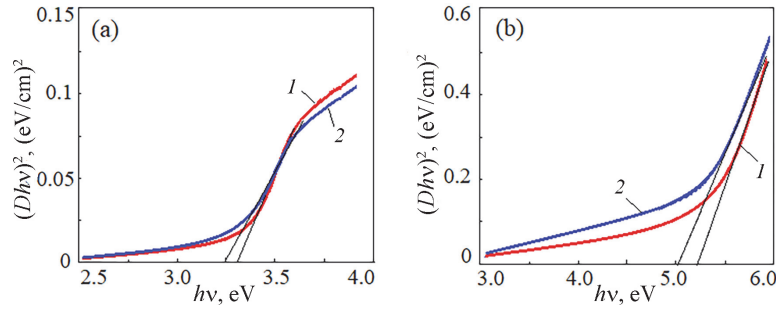


Рис.4. Зависимость $(Dhv)^2$ от энергии фотона $h\nu$ пленок (а) ZnO и (б) ZnO:Mg без подслоя (кривая 1) и с подслоем 2) ИТО.

На рис.4 представлены зависимости $(Dhv)^2$ от энергии фотона $h\nu$ изучаемых пленок, близких к ширине запрещенной зоны E_g , где D – коэффициент поглощения, ν – частота излучения, h – постоянная Планка. Для сравнения там же приведены эти же зависимости для пленок, осажденных непосредственно на поверхность подложек. Видно, что легирование ионами Mg приводит к увеличению ширины запрещенной зоны пленок. Так, расчетные значения E_g пленок ZnO и ZnO:Mg без подслоя ИТО составляют 3.36 и 5.25 эВ, соответственно. Такое поведение может быть связано с дефектами и локальными напряжениями кристаллической решетки из-за разницы в электроотрицательности и ионном радиусе между Zn и Mg, а также тем фактом, что MgO имеет более широкую запрещенную зону (7.7 эВ), чем ZnO. Для структур ИТО/ZnO и ИТО/ZnO:Mg ширина запрещенной зоны изучаемых пленок заметно уменьшается и составляет 3.24 и 5.04 эВ, соответственно. Возможно, что снижение E_g для структур с подслоем ИТО обусловлено диффузионным проникновением ионов индия и олова в структуру ZnO в процессе термообработки, что приводит к образованию в запрещенной зоне ZnO дополнительных примесных уровней.

На рис.5 представлены ВАХ структур ИТО/ZnO и ИТО/ZnO:Mg в темноте и под воздействием оптического излучения с различными длинами волн. Анализ этих характеристик позволяет оценить токоперенос в структурах и, тем самым, их фоточувствительность (отношение фотопроводимости к темновой проводимости). Экспериментальные кривые спектральной фоточувствительности S этих структур в диапазоне длин волн 290 – 1064 нм при напряжении смещения +8 В приведены на рис.6.

Как видно из рис.5, ВАХ обеих исследуемых структур имеют симметричный

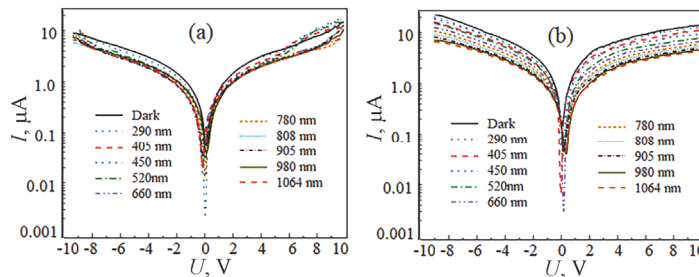


Рис.5. ВАХ структур (а) ИТО/ZnO и (б) ИТО/ZnO:Mg в темноте и под воздействием излучения с различными длинами волн.

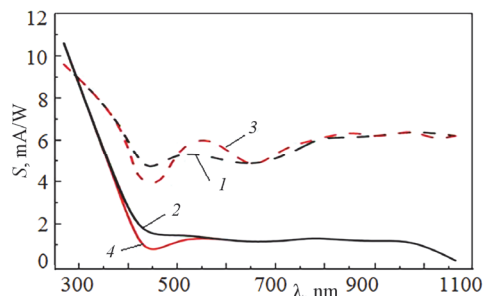


Рис.6. Экспериментальные (1 и 2) и смоделированные (3 и 4) кривые спектральной фоточувствительности структур ИТО/ЗnО (1 и 3) и ИТО/ЗnО:Мg (2 и 4).

вид и демонстрируют наличие фотопроводимости, причем структура ИТО/ЗnО:Мg имеет более выраженную фоточувствительность, чем ИТО/ЗnО. Для последней фоточувствительность проявляется в области коротких длин волн, а в видимом диапазоне она незначительна (рис.6). Минимум кривой при 450 нм определяется шириной запрещенной зоны самого ЗnО. В случае легирования ионами Мg спектральная фоточувствительность увеличивается практически во всем диапазоне длин волн с одновременным возникновением нескольких максимумов на длинах волн 278, 520 и 800 нм. Повышенная фоточувствительность обусловлена наличием дополнительных примесных уровней, способствующих фотогенерации избыточных носителей заряда. По сравнению с пленками без подслоя ИТО [19], изучаемые структуры имеют более высокую фоточувствительность во всем спектральном диапазоне длин волн. Кроме того, для них фоточувствительность к УФ излучению не является селективной, в отличие от пленок, непосредственно осажденных на подложки. Эти особенности связаны с отмеченными различиями структурного построения и ширины запрещенной зоны образцов с и без подслоя ИТО.

Отметим, что абсолютные значения фототока в исследованных структурах в силу значительного сопротивления оксидных пленок недостаточны для эффективного преобразования солнечной энергии на практике. Однако эти структуры можно использовать в качестве контактно-транспортных слоев в перовскитных солнечных элементах, а также фоточувствительных областей для оптических сенсоров и детекторов.

4. Нейросетевое моделирование

Актуальность использования нейросетевого моделирования в данном исследовании обусловлена возможностями искусственных нейронных сетей при определении нелинейных зависимостей в многомерных массивах данных, что существенно снижает необходимость проведения многочисленных технологических обработок и экспериментальных измерений.

Создание искусственных нейронных сетей для прогнозирования спектральной фоточувствительности структур ИТО/ЗnО и ИТО/ЗnО:Мg было реализовано на языке программирования Python с применением открытой программной библиотеки для машинного обучения TensorFlow [33]. При этом использовалась

функция активации ReLu (Rectified Linear Unit). Обучение проводилось методом обратного распространения ошибки с оптимизационным алгоритмом градиентного спуска Adam (Adaptive Moment Estimation). Были использованы искусственные нейронные сети прямого распространения с двумя скрытыми слоями, входными параметрами которых являлись состав структуры (С – ITO/ZnO или ITO/ZnO:Mg), значение напряжения смещения (U) и длина волны оптического излучения (λ) (рис.7). В качестве выходного параметра было выбрано соответствующее значение фототока (I).

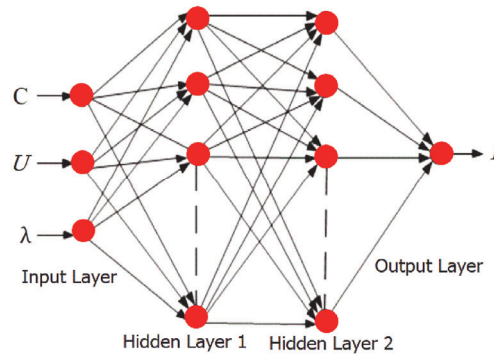


Рис.7. Архитектура искусственной нейронной сети.

Для обучения и тестирования нейронных сетей были проанализированы различные архитектуры сетей с использованием набора данных, содержащего 2000 вариантов, из них 20 – на основе результатов численных экспериментов (см. рис.5). Эффективность нейронных сетей оценивалась при помощи следующих критериев:

– средняя абсолютная ошибка (Mean Absolute Error, MAE)

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |d_i - y_i|;$$

– среднеквадратичная ошибка (Mean Square Error, MSE)

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (d_i - y_i)^2;$$

– коэффициент детерминации

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (d_i - y_i)^2}{\sum_{i=1}^n (d_i - \bar{d})^2},$$

где d_i – желаемый выход сети и y_i – реальный выход сети.

Были изучены валидационные ошибки критериев для всех обученных архитектур в зависимости от количества нейронов в скрытых слоях. На рис.8 показаны тепловые карты распределения MSE , R^2 и MAE , где горизонтальная и вертикальная оси представляют размеры первого и второго скрытых слоев, соответственно. Видно, что наблюдается тенденция к увеличению качества работы сетей с увеличением числа нейронов в первом и втором слоях от 10 к 17 (меньшие значения функций потерь MSE и MAE , более близкие к 1 значения R^2).

На основе всех выбранных критериев, в качестве наиболее адекватной для прогнозирования фоточувствительности структур ITO/ZnO и ITO/ZnO:Mg, была

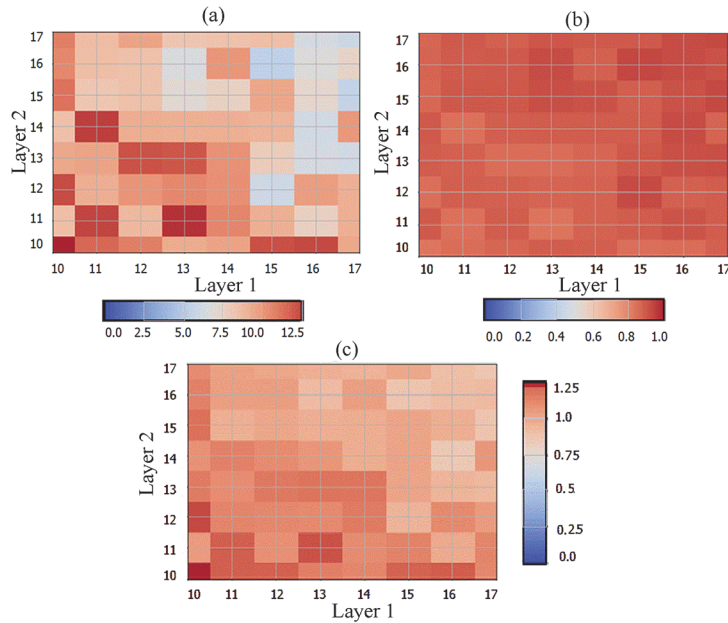


Рис.8. Тепловые карты распределения (a) MSE , (b) R^2 и (c) MAE .

отобрана искусственная нейронная сеть с архитектурой [4-16-15-1] ($MSE = 5.4$, $MAE = 0.9$ и $R^2 = 0.9323$), для которой сформированы ВАХ и получены уточненные зависимости спектральной фоточувствительности структур ИТО/ZnO и ИТО/ZnO:Mg (см. рис.6, смоделированные кривые). Изменение вида этих кривых по сравнению с экспериментальными связано с добавлением набора промежуточных длин волн фоточувствительных приборов.

В дальнейшем предполагается использование созданной нейросетевой модели в сочетании с излучением. Наблюдаемое смещение максимума с 530 на 550 нм структур ИТО/ZnO:Mg может соответствовать различным примесным уровням внутри запрещенной зоны пленок ZnO:Mg. Этот результат необходимо учесть при эксплуатации соответствующих возможностями генетического алгоритма для определения оптимальных параметров формирования золь-гель пленок.

5. Заключение

Представлены результаты исследования структурных и фотоэлектрических свойств двуслойных золь-гель покрытий состава ИТО/ZnO и ИТО/ZnO:Mg. Проанализированы ВАХ синтезированных структур в темноте и под воздействием оптического излучения разной длины волны. Показано, что легирование ионами Mg приводит к увеличению ширины запрещенной зоны пленок. Наличие подслоя ИТО способствует повышению фоточувствительности во всем спектральном диапазоне длин волн и уменьшает ширину запрещенной зоны пленок в результате диффузионного проникновения ионов индия и олова в структуру. Нейросетевым моделированием получены уточненные зависимости спектральной фоточувствительности структур ИТО/ZnO и ИТО/ZnO:Mg.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Комитета по науке РА (проект № 21AG-2B011) и Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (проекты T21APMG-004 и T22UZB-074).

ЛИТЕРАТУРА

1. **O. Gultepe, F. Atay.** *J. Mater. Sci: Mater. Electron.*, **33**, 15039 (2022).
2. **G.Y. Ayvazyan, M.V. Katkov, M.S. Lebedev, V.R. Shayapov, M.Yu. Afonin, D.E. Petukhova, I.V. Yushina, E.A. Maksimovskii, A.V. Aghabekyan.** *J. Contemp. Phys. (Armenian Acad. Sci.)*, **56**, 240 (2021).
3. **J. Cao, B. Wu, R. Chen, Y. Wu, Y. Hui, B.W. Mao, N. Zheng.** *Adv. Mater.*, **30**, 1705596 (2018).
4. **G.Y. Ayvazyan, D.L. Kovalenko, M.S. Lebedev, L.A. Matevosyan, A.V. Semchenko.** *J. Contemp. Phys. (Armenian Acad. Sci.)*, **57**, 274 (2022).
5. **Q. Xu, L. Cheng, L. Meng, Z. Wang, S. Bai, X. Tian, X. Jia, Y. Qin.** *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **11**, 26127 (2019).
6. **Y. Kang, F. Yu, L. Zhang, W. Wang, L. Chen, Y. Li.** *Solid State Ionics*, **360**, 115544 (2021).
7. **Y. Hou, Z. Mei, Z. Liu, H. Liang, C. Gu, X. Du.** *Thin Solid Films*, **634**, 165 (2017).
8. **W. He, Y. Feng, Z-D. Hu, A. Balmakou, S. Khakhomov, Q. Deng.** *J. Wang, IEEE Sensors J.*, **20**, 1801 (2020).
9. **G.C. Park, S.M. Hwang, J.H. Lim, J. Joo.** *Nanoscale*, **6**, 1840 (2014).
10. **P. Sridhar, K. Sakthivel, R.K. Sankaranarayana.** *Appl. Surf. Sci. Adv.*, **13**, 100382 (2023).
11. **G. Zheng, J. Song, J. Zhang, J. Li, B. Han, X. Meng, F. Yang, Y. Zhao, Y. Wang.** *Mater. Sci. Semicond. Process.*, **112**, 105016 (2020).
12. **Z.J. Othman, A. Matoussi.** *J. Alloys Comp.*, **671**, 366 (2016).
13. **K. Huang, Z. Tang, L. Zhang, J. Yu, J. Lv, X. Liu.** *Appl. Surf. Sci.*, **258**, 3710 (2012).
14. **D. Guo, K. Sato, S. Hibino, T. Takeuchi, H. Bessho, K. Kato.** *J. Mater. Sci.*, **49**, 4722 (2014).
15. **M. Rouchdi, E. Salmani, B. Fares, N. Hassanain, A. Mzerd.** *Results in Phys.*, **7**, 620 (2017).
16. **R. Kek, G.L. Ong, S.L. Yap, L.K. Lim, S.F. Koh, C.H. Nee, T.Y. Tou, S.S. Yap.** *Mater. Sci. Semicond. Process.*, **145**, 106636 (2022).
17. **H. Makhoulouf, C. Karam, A. Lamouchi, S. Tingry, P. Miele, R. Habchi, R. Chtourou, M. Bechelany.** *Appl. Surf. Sci.*, **444**, 253 (2018).
18. **A.M. Rosa, E.P. da Silva, E. Amorim, M. Chaves, C. Catto, P.N. Lisboa-Filho, J.R.R. Bortoleto.** *J. Phys. Conf. Ser.*, **370**, 012020 (2012).
19. **V.V. Sidsky, V.V. Malyutina-Bronskaya, S.A. Soroka, K.D. Danilchenko, A.V. Semchenko, V.A. Pilipenko.** *Lecture Notes in Networks and Syst.*, **422**, 227 (2022).
20. **G. Malik, S. Mourya, J. Jaiswal, R. Chandra.** *Mater. Sci. Semicond. Process.*, **100**, 200 (2019).
21. **W. Yang, J. Liu, Z. Guan, Z. Liu, B. Chen, L. Zhao, Y. Li, X. Cao, X. He, C. Zhang, Q. Zeng, Y. Fu.** *Ceramics Internat.*, **46**, 6605 (2020).
22. **Ş. Ṫalu, S. Boudour, I. Bouchama, B. Astinchap, H. Ghanbaripour, M.S. Akhtar, S. Zahra.** *Microscopy Research and Techn.*, **85**, 1213 (2022).
23. **B.Z. Bhari, K.S. Rahman, P. Chelvanathan, M.A. Ibrahim.** *Mater. Let.*, **339**, 134097 (2022).
24. **S.-L. Young, M.-C. Kao, H.-Z. Chen, N.-F. Shih, C.-Y. Kung, C.-H. Chen.** *J. of Nanomater.*, **2015**, 1 (2015).
25. **O. Dobrozhan, O. Diachenko, M. Kolesnyk, A. Stepanenko, S. Vorobiov, P. Baláž,**

- S. Plotnikov, A. Opanasyuk.** Mater. Sci. Semicond. Process., **102**, 104595 (2019).
26. **A. Vaseashta, G. Ayvazyan, S. Khudaverdyan, L. Matevosyan.** Phys. Status Solidi RRL, **17**, 2200482 (2023).
27. **K. Kawajiri, K. Tahara, S. Uemiya.** Resour. Environ. Sustain., **7**, 100047 (2022).
28. **S. Nagpal, S.V. Rahul, P.K. Bhatnagar.** Eng. Res. Express, **2**, 025007 (2020).
29. **I. Madhi, B. Bouzid, M. Saadoun, B. Bessaïs.** Ceramics Internat., **41**, 6552 (2015).
30. **G. Ayvazyan, A. Vaseashta, F. Gasparyan, S. Khudaverdyan.** J. Mater Sci: Mater. Electron., **33**, 17001 (2022).
31. **K. Vijayalakshmin, A. Renitta, K. Karthick.** Ceramics Internat., **40**, 6171 (2014).
32. **H.V. Asriyan, A.A. Shatveryan, V.M. Aroutiounian, F.V. Gasparyan, S.V. Melkonyan, Z.H. Mkhitharian.** Proc. SPIE, **5846**, 192 (2005).
33. **F. Chollet.** Deep Learning with Python. New York, Manning Publications Co., 2021.

ԶՈՒ-ԳԵԼ ITO/ZnO ԵՎ ITO/ZnO:Mg ԿԱՌՈՒՑՎԱԾՔՆԵՐԻ ՄԻՆԹԵԶ,
 ՀՍԱԿՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ՇԵՏԱԶՈՏՈՒՄ ԵՎ ՆԵՅՐՈՑԱՆՑԱՅԻՆ ՄՈՂԵԼԱՎՈՐՈՒՄ

Գ.Ե. ԱՅՎԱԶՅԱՆ, Կ.Դ. ԴԱՆԻԼՉԵՆԿՈ, Դ.Լ. ԿՈՎԱԼԵՆԿՈ, Ա.Ա. ՄԱԵՎՍԿԻ,
 ՅՆՎ. ՆԻԿԻՏՅՈՒԿ, Վ.Ա. ՊՐՈԽՈՐԵՆԿՈ, Ա.Վ. ՍԵՄՉԵՆԿՈ, Վ.Վ. ՄԻԴՄԿԻՅ,
 Ս.Ա. ԽԱԽՈՄՈՎ, Վ.Վ. ՄԱԼՅՈՒՏԻՆԱ-ԲՐՈՆՍԿԱՅԱ, Ա.Վ. ՆԵՍՏԵՐԵՆՈԿ

Զուլ-գել մեթոդով պատրաստվել են ITO/ZnO և ITO/ZnO:Mg երկշերտ կառուցվածքներ և փորձնականորեն հետազոտվել են դրանց կառուցվածքային և ֆոտոէլեկտրական հատկությունները: Ցույց է տրվել, որ համեմատած առանց ITO ենթաշերտի ZnO և ZnO:Mg թաղանթների, նկատելիորեն փոխվում է մորֆոլոգիան և նվազում է արգելված գոտու լայնությունը: Վերլուծվել են ստացված կառուցվածքների վոլտ-ամպերային բնութագրերը՝ մթության մեջ և տարբեր երկարությունների օպտիկական ճառագայթման ազդեցության տակ: Արհեստական նեյրոնային ցանցերի միջոցով մոդելավորվել է դրանց սպեկտրային լուսազգայունությունը:

SYNTHESIS, INVESTIGATION AND NEURAL NETWORK MODELING OF THE
 PROPERTIES OF SOL-GEL ITO/ZnO AND ITO/ZnO:Mg STRUCTURES

G.Y. AYVAZYAN, K.D. DANILCHENKO, D.L. KOVALENKO, A.A. MAEVSKY,
 Yu.V. NIKITYUK, V.A. PROKHORENKO, A.V. SEMCHENKO, V.V. SIDSKY,
 S.A. KHAKHOMOV, V.V. MALYUTINA-BRONSKAYA, A.V. NESTERENOK

ITO/ZnO and ITO/ZnO:Mg bilayer structures were fabricated by the sol-gel method and their structural and photoelectric properties were experimentally studied. It is shown that, compared with ZnO and ZnO:Mg films without an ITO sublayer, the morphology changes noticeably and the band gap decreases. The $I-V$ characteristics of obtained structures were analyzed in the dark and under the influence of optical radiation of different wavelengths. Using artificial neural networks, their spectral photosensitivity was modeled.