

В ходе исследования разработана технология получения наночастиц WS_2 методом лазерной абляции в изопропиловом спирте. Получены нанокompозитные пленки PEDOT:PSS, допированные наночастицами WS_2 . Определена критическая концентрация наночастиц WS_2 в составе нанокompозитной пленки PEDOT:PSS:NP WS_2 , равная 6%, при превышении которой наблюдается возрастание шероховатости поверхности пленок PEDOT:PSS в 1,4 раза.

Список литературы

1. Gusain A., Faria R.M. et al. Polymer Solar Cells – Interfacial Processes Related to Performance Issues // Front. Chem. – 2019. – Vol. 7. – P. 61-1-61-25.
2. Alemu D., Wei H.Y., Ho K.-C. et al. Highly conductive PEDOT:PSS electrode by simple film treatment with methanol for ITO-free polymer solar cells // Energy Environ. Sci. – 2012. – Vol. 5, №11. – P. 9662-9671.
3. Kaltentbrunner M., Adam G., Głowacki E.D. et al. Flexible high power-per-weight perovskite solar cells with chromium oxide–metal contacts for improved stability in air // Nat. Mater. – 2015. – Vol. 14, №10. – P. 1032-1039.

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ОТЖИГА НА ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПЛЕНОК NiO_x

**М.К. Бейсембеков, С.К. Тажибаев, А.А. Берик, А.А. Боканова,
А.Ж. Тусипов, А.К. Зейниденов**

Карагандинский университет им. Букетова, Научный центр нанотехнологий и функциональных наноматериалов, г. Караганда, Казахстан, baiboldy_han@mail.ru

В данной работе проведены исследования по влиянию температуры окисления пленок NiO_x на электрофизические свойства. Пленки NiO_x были получены методом spin-coating из раствора гексагидрат нитрата никеля в этиленгликоле с последующим термическим окислением в диапазоне 200-450°C. Повышение температуры окисления приводит к уменьшению толщины формируемых пленок NiO_x . Методом импеданс спектроскопии исследованы электротранспортные характеристики пленок NiO_x . Возрастание температуры окисления пленок NiO_x приводит к возрастанию значения суммарного сопро-

тивление (R_1) и уменьшению сопротивления рекомбинации дырок (R_2) на границе раздела NiO_x /электрод.

Ключевые слова: золь-гель технология, никель оксид, тонкие пленки, электрофизические свойства, импедансная спектроскопия.

Получение пленок оксида никеля на поверхности твердой подложки осуществляли следующим образом: Гексагидрат нитрата никеля $[Ni(NO_3)_2 \cdot 6H_2O]$ массой $m=145$ мг (Sigma-Aldrich) растворяли в объеме этиленгликоля $V=1$ мл. К полученному раствору добавляли моноэтаноламин (5 мкл). Раствор перемешивали при комнатной температуре в течение 16 часов, а затем выдерживали в течение 24 часов при комнатной температуре. Полученный раствор при помощи пипеточного дозатора наносился на поверхность твердой подложки методом центрифугирования (SPIN150i, Semiconductor Production System) при скорости вращения 1500 об/мин. Полученные пленки предварительно отжигали при температуре $100^\circ C$ в течение 15 минут. После пленки отжигались на атмосфере воздуха при температурах от 200 до $450^\circ C$ в течение 45 минут (Рисунок 1).

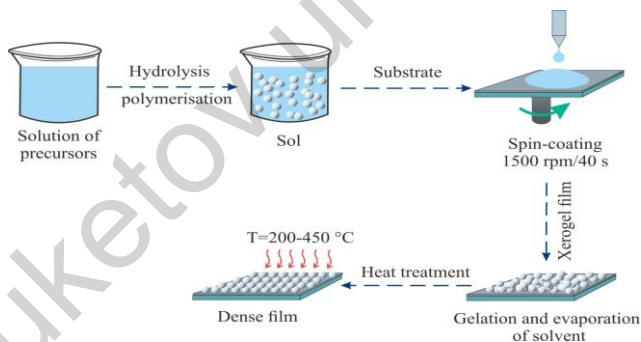


Рисунок 1. Схематическое изображение осаждения тонких пленок NiO_x

Измерения спектров импеданса проводили на потенциостат-гальваностате Р45Х в режиме импеданса с дополнительно установленным модулем частотного анализатора FRA-24М. Погрешность определения параметров транспорта носителей заряда не превышала 5% и составляла преимущественно 1-1,5%. Анализ спектральных параметров проводили с помощью программного обеспечения EIS-анализатора в соответствии с процедурой, описанной в работе [1].

Изменения оптических и структурных свойств с ростом температуры отжига очевидно будет влиять на дырочный транспорт в пленках NiO_x . Для детального изучения влияния структуры NiO_x на транспорт носителей заряда в пленке были измерены спектры электрического импеданса.

На рисунке 2 представлены импеданс спектры ячеек $\text{FTO}/\text{NiO}_x/\text{Al}$, отожженных при разных температурах, полученных с помощью фитинга годографов. Анализ модели проводился согласно эквивалентной электрической схеме (вставка на рисунке 2). В таблице 1 представлены электротранспортные параметры ячеек, рассчитанные с помощью программного пакета EIS-analyzer, где: k_{eff} - эффективная скорость извлечения носителей заряда с NiO_x , τ_{eff} - эффективное время прохождения заряда через NiO_x , R_1 - суммарное сопротивление внешних электродов прилегающих к NiO_x (общее сопротивление пленки), R_2 - сопротивление рекомбинации на границе NiO_x /электрод. Емкость C , связана с зарядом, хранящимся в этом слое NiO_x .

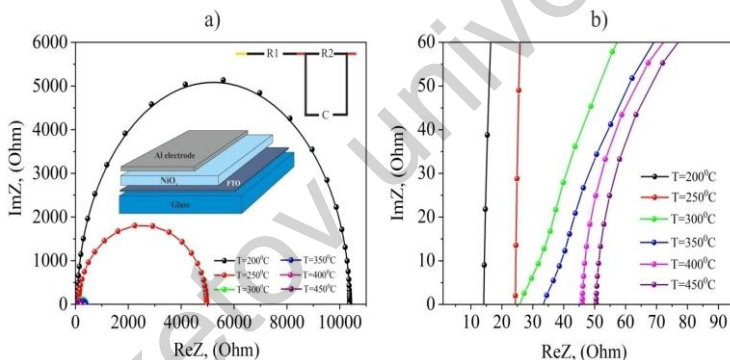


Рисунок 2. Спектры импеданс ячеек $\text{FTO}/\text{NiO}_x/\text{Al}$, отожженных при разных температурах

R_1 представляет суммарное сопротивление внешних электродов прилегающих слоев (FTO/Al). Так как в исследуемых ячейках все функциональные слои, кроме NiO_x , были получены при одинаковых условиях, то изменения R_1 связано с изменением сопротивления пленок NiO_x . Как видно из таблицы 1 значение R_1 имеет наименьшее значение у ячейки с NiO_x отожжённой при 200°C . Дальнейший рост температуры отжига NiO_x приводит к росту значения R_1 . Возрастание значения сопротивления R_1 с ростом температуры отжига NiO_x пленок связано с

формированием кристаллитов при уплотнении пленки в результате термического отжига, поскольку толщина пленки уменьшается [2].

Сопротивления R_2 характеризующее рекомбинацию зарядов на границе раздела $\text{NiO}_x/\text{электрод}$, так же меняется в зависимости от температуры отжига пленки NiO_x . Чем больше значение R_2 тем меньше скорость рекомбинации на границе раздела $\text{NiO}_x/\text{электрод}$. Как видно из таблицы 1, ячейки с NiO_x отожженной при температуре 200°C имеет наибольшее значение сопротивления R_2 , что указывает на низкую скорость рекомбинации дырок на границе раздела $\text{NiO}_x/\text{электрод}$ [3]. Отжиг NiO_x при 300°C приводит к уменьшению рекомбинационного сопротивления в 20 раз, что означает об усилении рекомбинационных процессов при повышении температуры отжига. При достижении температуры отжига 450°C сопротивление рекомбинации R_2 снижается в 40 раз. На возрастание скорости рекомбинации дырок свидетельствует так же наблюдаемое уменьшение значения параметра k_{eff} , который характеризует эффективную скорость извлечения дырок в пленке (таблица 1).

Таблица 1. Значение электрофизических параметров пленок

Температура отжига, $^\circ\text{C}$	R_1 , (Ohm)	R_2 , (Ohm)	τ_{eff} , (msec)	k_{eff} , (sec^{-1})	C	μ
200	14.16	10390	2.3	427	5.3624	$1.29 \cdot 10^{15}$
250	24.28	4946	3.3	296	5.9621	$1.02 \cdot 10^{15}$
300	25.41	516.76	13.5	74	5.8516	$0.66 \cdot 10^{15}$
350	33.28	486.65	19.2	52	5.5103	$0.61 \cdot 10^{15}$
400	46.01	321.52	27.7	36	5.1044	$0.51 \cdot 10^{15}$
450	50.88	260.88	47.6	21	4.8137	$0.45 \cdot 10^{15}$

Импеданс спектроскопия позволяет также посчитать постоянную времени $\tau_{\text{eff}} = RC$, характеризующая время пролета носителей заряда через пленку NiO_x . Значение τ_{eff} увеличивается при повышении температуры термического оксидирования, это свидетельствует об увеличении средней длины пути движения дырок в пленке, которое связано с возрастанием плотности дефектов в пленке [4], образованных вакансиями Ni. Таким образом наблюдаемое усиление рекомбинации дырок на границе раздела $\text{NiO}_x/\text{электрод}$, указывает на увеличение плотности поверхностных дефектов Ni в пленке NiO_x в результате термического отжига.

Проведены исследования по влиянию температуры термического оксидирования пленок NiO_x , полученных методом spin-coating из раствора гексагидрат нитрата никеля на их электрофизические свойства. Измерены спектры электрического импеданса пленок NiO_x , отожженных при разных температурах. Показано, что сопротивление внешних электродов прилегающих к NiO_x увеличивается с ростом температуры отжига в то время как сопротивление рекомбинации на границе NiO_x /электрод уменьшается. Наблюдаемое возрастание сопротивления пленки R_1 при повышении температуры отжига связано с уплотнением пленки а уменьшение сопротивления R_2 связано с усилением рекомбинации дырок на границе разделе NiO_x /электрод.

Список литературы

1. J. Bisquert, I. Mora-Sero, F. Fabregat-Santiago, Diffusion-Recombination Impedance Model for Solar Cells with Disorder and Nonlinear Recombination, ChemElectroChem 1(1) (2013) 289-296, <https://doi.org/10.1002/celec.201300091>.
2. M. Shkir, V. Ganesh, S. AlFaify, I. S. Yahia, H. Y. Zahran, Tailoring the linear and nonlinear optical properties of NiO thin films through Cr^{3+} doping, Journal of Materials Science:Materials in Electronics 29(8) (2018) 6446-6457, <https://DOI:10.1007/s10854-018-8626-y>.
3. C.-B. Kim, C.B. Su, Measurement of the refractive index of liquids at 1.3 and 1.5 micron using a fibre optic Fresnel ratio meter, Meas. Sci. Technol. 15(9) (2004) 1683-1686, <https://DOI:10.1088/0957-0233/15/9/002>.
4. S.R. Nalage, M.A. Chougule, S. Sen, P.B. Joshi, V.B. Patil, Sol- gel synthesis of nickel oxide thin films and their characterization, Thin Solid Films 520 (2012) 4835-4840, <https://DOI:10.1016/j.tsf.2012.02.072>.

INFLUENCE OF THE CHEMICAL STRUCTURE OF POLYMETHINE DYE ON SPECTRAL – FLUORESCENT AND GENERATION PROPERTIES

Kanapina A.E., Tuganbekova A.S.

Buketov Karaganda University, Karaganda, Kazakhstan,
alua.tuganbekova2004@mail.ru

The present study examines the spectral-luminescent properties of a cationic polymethine dye in ethanol solutions at two concentrations (10^{-3}