

НИЗЬКОТЕМПЕРАТУРНА ТЕХНОЛОГІЯ ОТРИМАННЯ ПРОЗОРИХ ПЛІВОК ІТО З ВИСОКОЮ ПРОВІДНІСТЮ

В. Васільєв¹, Б. Турко¹, Л. Грицак¹, М. Рудко¹, Н. Швець¹

¹ Ivan Franko National University of Lviv, Dragomanova Str., 50, Lviv, 79005, Ukraine

Анотація

Досліджено вплив низькотемпературного відпау (до 150°C) та опромінення світлом від кварцової ртутної лампи (протягом часу до 20 хв) на структурні, оптичні та електричні властивості плівок ІТО товщиною 0,8 мкм, осаджених методом ВЧ-магнетронного розпилення на оптично прозорі скляні підкладки, без підігріву. Встановлено, що низькотемпературний відпал протягом однієї години та короткотривале опромінення світлом кварцової ртутної лампи приводять до зростання середніх розмірів кристалітів, середньо-квадратичної шорсткості поверхні, зменшення величини питомого електроопору плівок ІТО, а також до підвищення оптичної прозорості, і відповідно, пониження величини коефіцієнта відбивання у видимому діапазоні спектру. Наведені результати можуть бути корисними в інженерії електронних пристроїв на основі матеріалів з низькою термостійкістю.

Ключові слова: індію-олова оксид, тонкі плівки, спектри поглинання, спектри відбивання, кристалічна структура, електроопір.

1. Вступ

Головними напрямками застосування прозорої електроніки є сенсорні дисплеї, гнучкі дисплеї, органічні світлодіоди (OLED), електролюмінесцентні випромінювачі, тонкоплівкові фотовольтаїчні елементи, різні електронні та оптичні покриття для інших пристроїв функціональної електроніки [1].

Індію-олова оксид (ІТО, 10 ваг. % SnO_2) – провідний оксидний матеріал, який зараз найширше використовують у сучасних електронних і сенсорних пристроях. Незважаючи на високу ціну цього матеріалу (приблизно 1000 дол. США за 1 кг) та наявні альтернативи, він досі зберігає свої панівні позиції на ринку прозорих провідних покриттів [1].

Наукове зацікавлення плівками ІТО – стабільно високе. Більшість наявних у цьому напрямі публікацій присвячена дослідженням впливу технологічних параметрів отримання і подальшого оброблення на оптико-електричні властивості плівок ІТО. Зокрема, вже встановлено, що підвищити електропровідність та оптичну прозорість плівок ІТО можна термічним відпадом за температур, вищих за 200°C [15, 18]. Існує низка електронних пристроїв, чутливих до тепла, з оптично прозорими електродами. Тому на різних етапах процесу їхнього виготовлення температура не повинна перевищувати 100°C.

Отримання конкурентоспроможних високоякісних плівок ІТО на основі низькотемпературних технологій у промислових масштабах все ще залишається проблемою, яку намагаються вирішити, в тім числі, з використанням магнетронного розпилення [19].

Оптично прозорі електропровідні покриття можуть покращити експлуатаційні характеристики звичайних нагрівальних елементів, демонструючи високу теплоємність зі швидким регулюванням темпера-

тури та малу теплову інерцію без шкоди для їхнього оптичного пропускання [19].

Оброблення ультрафіолетовим (УФ) світлом використовують для очищення поверхонь плівок ІТО від карбонових сполук та зміни співвідношення в кількості поверхневих атомів In, Sn та O, що приводить до збільшення роботи виходу електронів з ІТО [20, 27, 21]. Підвищення роботи виходу електронів з ІТО є корисним, оскільки завдяки цьому знижується інтерфейсний бар'єр і підвищується ефективність інжекції дірок з ІТО в органічний шар, тобто покращується робота органічних сонячних елементів та органічних світлодіодів [21, 27].

Число публікацій щодо комплексних досліджень впливу низькотемпературного відпау [28] чи опромінення світлом на структурні, оптичні та електричні властивості плівок ІТО [Aleksandrova2012, Plumley2018] є незначним. Тому у цій публікації наведено результати наших досліджень, присвячених вирішенню вказаної наукової, технологічної задачі.

2. Експеримент

Плівки ІТО отримано методом ВЧ магнетронного розпилення комерційної мішені (99,99 % чистоти, Sigma-Aldrich) на оптично прозорі для довжин хвиль світла, вищих за 300 нм, скляні підкладки в атмосфері аргону за робочого тиску газу 0,1 Па, потужності ВЧ генератора 75 Вт, відстані між мішенню та підкладкою 60 мм, індукції магнітного поля 0,1 Тл, без підігріву підкладок. Час розпилення становив 1 годину. За даними еліпсометричних вимірювань товщина плівок була приблизно рівною 0,8 мкм.

Частину плівок ІТО відпалювали на повітрі протягом 1 години за різних температур в муфельній електропечі «CNOL-0,2/1250» (Umega GroupAB, м.

Утена, Литва). Іншу частину зразків опромінювали протягом різних проміжків часу світлом від кварцової ртутної лампи ДРТ-125. Морфологію поверхні експериментальних зразків вивчали атомно-силовим мікроскопом Solver P47-PRO. Вимірювання еліпсометрії проводили еліпсометром ЛЕФ-3 М. Джерелом світла був He-Ne-лазер ($\lambda = 632,8$ нм).

Для вивчення спектрів поглинання та відбивання світла в УФ та видимій областях спектра використовували портативний оптоволоконний спектрометр фірми Avantes BV (м. Апелдорн, Нідерланди) «AvaSpec-ULS2048L-USB2-UA-RS» з входною щільною 25 мкм, з дифракційною ґраткою 300 штр./мм. Детектування світла у спектрометрі здійснюється ПЗЗ-матрицею на 2048 пікселів. Для автоматизованого комп'ютерного керування спектрометром і опрацювання спектрів використовувалося спеціальне програмне забезпечення. Використовувалися галогенно-дейтерієве джерело світла AvaLight-DHc та еталон відбивання світла WS-2 (Avantes BV, м. Апелдорн, Нідерланди).

Питомий електроопір плівок ІТО вимірювали чотиризондовим методом за кімнатної температури з використанням електрометра Keithley 2401 (Keithley Instruments Inc., м. Клівленд, США) [18]. Використовували срібні тонкоплівкові електроди, осаджені термічним вакуумним випаровуванням у вакуумному універсальному пості ВУП-5М (БАТ «SELMI», м. Суми, Україна).

3. Результати експерименту та їхнє обговорення

З використанням методу атомно-силової мікроскопії отримано інформацію про морфологію поверхні плівок ІТО (рис. 1).

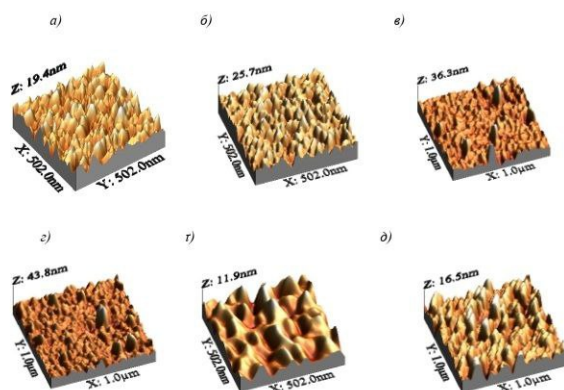


Рис. 1. Тривимірні зображення плівок ІТО: а) без відпау і опромінення світлом лампи ДРТ-125; б) відпаленої за 50°C; в) відпаленої за 100°C; г) відпаленої за 150°C; р) після 5 хв. опромінення світлом лампи ДРТ-125; д) після 20 хв. опромінення світлом лампи ДРТ-125

З підвищенням температури відпау зростають розміри кристалітів у плівках. Освітлення кварцо-

вою ртутною лампою також привело до структурної перебудови плівок ІТО. Внаслідок опромінення де-що зросли розміри кристалітів, що узгоджується з даними робіт [27, 29]. Автори праці [27] здійснювали 10 хвилинне опромінення плівок ІТО УФ світлом з довжиною хвилі 365 нм від 250 Вт джерела, тоді як в роботі [29] плівки ІТО опромінювали світлом від імпульсної дугової ксенонової лампи, яка знаходилася на віддалі в 22 мм від зразка. Тривалість опромінення складала 20 с (20 циклів, з коротким проміжком часу між циклами для охолодження, кожен цикл складався з 8 імпульсів; тривалість імпульсів була рівною 200 мкс, проміжок між імпульсами – 75 мкс, інтенсивність першого імпульсу – 35 кВт/см², другого – 26 кВт/см², третього – 22 кВт/см², четвертого – 18 кВт/см², п'ятого – 15 кВт/см², шостого – 12 кВт/см², сьомого – 10 кВт/см², восьмого – 8 кВт/см²).

Згідно з даними роботи [29], в необроблених відпа-лом чи опроміненням плівках ІТО є значною аморфна частка, яка складається з поглинаючих видиме світло сполук InO_x , SnO та атомів In^{+0} , Sn^{+0} . При опроміненні видиме світло локально поглинається атомами металів та частково окисленими сполуками.

Поглинання збуджує ці частинки, і їхня наступна коливальна релаксація приводить до локального нагрівання місця їхнього розміщення у плівці [29]. Далі це тепло приводить до окислення і реакцій кристалізації, за яких дрібні кристаліти починають рости у місцях зародкоутворення. Оптично непрозорі вкраплення In^{+0} та InO_x кристалізуються в оптично прозорий оксид In_2O_3 , так само як оптично непрозорі вкраплення Sn^{+0} та SnO кристалізуються в оптично прозорий оксид SnO_2 , і ріст кристалітів під дією опромінення видимим світлом припиняється. УФ та інфрачервоне світло також призводитиме до зростання кристалітів у плівках ІТО, однак, разом з тим відбуватимуться й шкідливі для отримання якісних плівок процеси, такі як фоторозклад і абляція.

Фоторозклад та абляція понижуватимуть електропровідність та оптичну прозорість плівок ІТО [29]. На рис. 2 зображено спектри поглинання плівок ІТО отриманих за різних технологічних умов. Згідно з наведеними спектрами, найнижчою оптичною прозорістю у видимому діапазоні володіли невідпалені і неопромінені світлом лампи ДРТ-125 плівки ІТО, а найвищою – зразки, відпалені за найвищої температури (150°C) та опромінені протягом 5 хв світлом від лампи ДРТ-125. Подальше збільшення часу опромінення призвело до пониження оптичної прозорості плівок.

Коефіцієнти поглинання α розраховували за формулою Бугера–Ламберта–Бера на основі спектрів пропускання. У загальному випадку коефіцієнт поглинання пов'язаний із шириною забороненої зони E_g відношенням [4, 6, 14, 15, 18]:

$$\lambda h\nu = B(h\nu - E_g)r \quad (1)$$

де $r = 1/2$ для прямих дозволених переходів; B – стала, практично незалежна від енергії фотонів. Значення оптичної ширини забороненої зони отримані

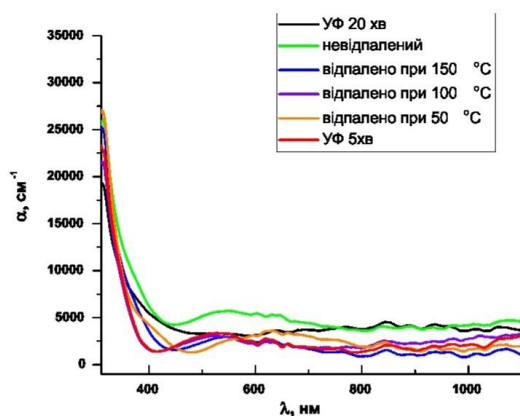


Рис. 2. Спектри поглинання плівок ІТО, отриманих за різних технологічних умов: без відпалу і опромінення світлом лампи ДРТ-125 (зелена лінія); відпаленої за 50°C (оранжева лінія); відпаленої за 100°C (фіолетова лінія); відпаленої за 150°C (синя лінія); після 5 хв. опромінення світлом лампи ДРТ-125 (червона лінія); після 20 хв. опромінення світлом лампи ДРТ-125 (чорна лінія)

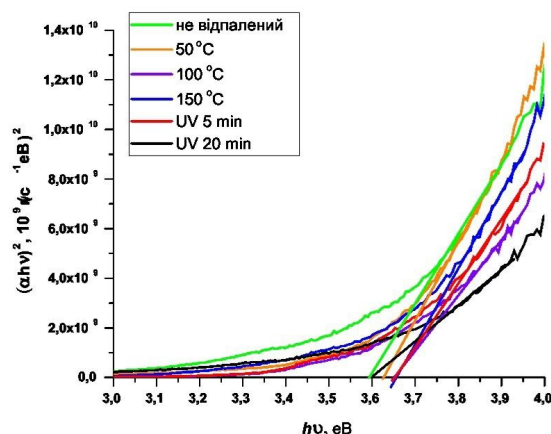


Рис. 3. Спектри поглинання в координатах $(\alpha h\nu)^2 = f(h\nu)$ плівок ІТО: без відпалу і опромінення світлом лампи ДРТ-125 (зелена лінія); відпаленої за 50°C (оранжева лінія); відпаленої за 100°C (фіолетова лінія); відпаленої за 150°C (синя лінія); після 5 хв. опромінення світлом лампи ДРТ-125 (червона лінія); після 20 хв. опромінення світлом лампи ДРТ-125 (чорна лінія)

із залежностей $(\lambda h\nu)^2$ від $h\nu$ в області високого поглинання з екстраполяцією лінійних ділянок кривих до $(\lambda h\nu)^2 = 0$ [4, 6, 14, 15, 18]. Аналіз фундаментального краю поглинання за допомогою співвідношення 1 показує, що оптична ширина забороненої зони E_g : невідпаленої і неопроміненої плівки ІТО приблизно рівна 3,5 еВ, відпаленої за 50°C – 3,63 еВ, відпаленої за 100°C – 3,65 еВ, відпаленої за 150°C – 3,66 еВ, опроміненої протягом 5 хв світлом лампи ДРТ-125 – 3,65 еВ, опроміненої протягом 20 хв світлом лампи ДРТ-125 – 3,60 еВ (рис. 3). Отримані значення величин E_g корелюють з даними робіт [6, 15].

На рис. 4 зображено спектри відбивання плівок ІТО отриманих за різних технологічних умов. Термічний відпал та опромінення світлом кварцової ртутної лампи знижують величини коефіцієнтів відбивання у видимому діапазоні довжин хвиль світла.

З підвищенням температури відпалу до 150°C та зі збільшенням часу опромінення кварцовою ртутною лампою до 20 хв зафіксовано зниження величини питомого електроопору, що узгоджується з даними робіт [11, 15, 27, 29].

4. Висновки

Проведено дослідження впливу низькотемпературного відпалу та опромінення світлом від кварцової ртутної лампи ДРТ-125 на структурні, оптичні та електричні властивості плівок ІТО товщиною 0,8 мкм, осаджених методом ВЧ-магнетронного розпилення на оптично прозорі для довжин хвиль світла, більших за 300 нм, скляні підкладки. При осадженні підігрів підкладок не застосовувався.

Встановлено, що низькотемпературний відпал протягом однієї години та короткотривале опромінення світлом кварцової ртутної лампи приводять до зростання середніх розмірів кристалітів та середньо-

квадратичної шорсткості поверхні плівок ІТО. Зокрема, після відпалу плівки ІТО за температури 150°C середній розмір кристалітів та середньо-квадратична шорсткість поверхні зросли приблизно втричі, а після 20 хв опромінення – приблизно в 1,6 разів, відповідно. Найнижчою оптичною прозорістю у видимому діапазоні спектру серед досліджуваних експериментальних зразків володіли невідпалені і неопромінені світлом плівки ІТО, а максимальною – відпалені за найвищої температури (150°C) та опромінені протягом 5 хв світлом від лампи ДРТ-125. Підвищення часу опромінення призводить до зниження оптичної прозорості плівок, що може бути зумовленим зростанням кількості дефектів за рахунок процесів фоторозкладу ІТО та абляції.

Термічний відпал та опромінення світлом кварцової ртутної лампи знижують коефіцієнт відбивання плівок ІТО у видимому діапазоні спектру. На основі проведеного аналізу спектрів оптичного поглинання плівок ІТО, виявлено зростання величини їхньої оптичної ширини забороненої зони з 3,59 еВ для невідпаленої плівки і аж до 3,66 еВ зі зростанням температури відпалу до 150°C. Натомість, залежність величини оптичної ширини забороненої зони плівок ІТО від часу опромінення світлом кварцової ртутної лампи є нетривіальною. Опромінення плівок ІТО світлом кварцової ртутної лампи протягом 5 хв. приводить до зростання E_g з 3,59 еВ до 3,65 еВ, тоді як вже після 20 хв опромінення E_g знижується до 3,6 еВ. Це пов'язано зі змінами концентрації структурних дефектів: її зниженням після 5-хвилинного опромінення світлом за рахунок зростання розмірів кристалітів та формування оксидних сполук In_2O_3 та SnO_2 , і відповідно, зростанням після 20 хв. опромінення через процеси фоторозкладу та абляції. З підвищенням температури відпалу до 150°C та зі

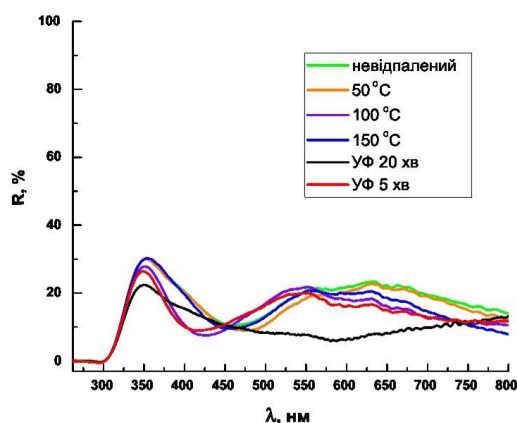


Рис. 4. Спектри поглинання плівок ІТО, отриманих за різних технологічних умов: без відпалу і опромінення світлом (зелена лінія); відпаленої за 50°C (оранжева лінія); відпаленої за 100°C (фіолетова лінія); відпаленої за 150°C (синя лінія); після 5 хв. опромінення світлом лампи ДРТ-125 (червона лінія); після 20 хв. опромінення світлом лампи ДРТ-125 (чорна лінія)

збільшенням часу опромінення кварцовою ртутною лампою до 20 хв. зафіксовано зменшення величини питомого електроопору плівок ІТО.

Наведені результати можуть бути корисними в інженерії електронних пристроїв на основі матеріалів з низькою термостійкістю.

Подяка

Ця дослідницька робота була підтримана Міністерством освіти і науки України.

Перелік використаних джерел

1. *ZnO as Multifunctional Material for Nanoelectronics*. 2nd Supplemented Edition / Turko B., Kapustianyk V. – Beau Bassin : Scholars' Press, 2020. – 160 p. (ISBN: 978-613-8-91964-3).
2. Shigesato Y. *ITO thin-film transparent conductors: Microstructure and processing* / Y. Shigesato, I. Yasui, D. C. Paine // JOM: the journal of the Minerals, Metals & Materials Society. – 1995. – V. 47. – P. 47–50. <https://doi.org/10.1007/BF03221436>.
3. Sofi A. H. *Structural, Optical and Electrical Properties of ITO Thin Films* / A. H. Sofi, M. A. Shah, K. Asokan // Journal of Electronic Materials. – 2018. – V. 47. – P. 1344–1352. DOI: 10.1007/s11664-017-5915-9.
4. Kim J. *High-temperature optical properties of indium tin oxide thin-films* / J. Kim, S. Shrestha, M. Souiri, J. G. Connell, S. Park, A. Seo // Scientific Reports. – 2020. – V. 10. – P. 12486 (8 pp). <https://doi.org/10.1038/s41598-020-69463-4>.
5. Hacini A. *Optimization of ITO thin film properties as a function of deposition time using the swanepoel method* / A. Hacini, A. H. Ali, N. N. Adnan // Optical Materials. – 2021. – V. 120. – P. 111411 (10 pp) <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2021.111411>.
6. Sibin K. P. *Optical and electrical properties of ITO thin films sputtered on flexible FEP substrates as passive thermal control system for space applications* / K. P. Sibin, N. Swain, P. Chowdhury, A. Dey, N. Sridhara, H. D. Shashikala, A. K. Sharma, H. C. Barshilia // Solar Energy Materials & Solar Cells. – 2016. – V. 145. – P. 314–322. <http://dx.doi.org/10.1016/j.solmat.2015.10.035>.
7. Rozati, M. *Transparent conductive Sn-doped indium oxide thin film deposited by spray pyrolysis techniques* / M. Rozati, T. Ganj // Renew. Energy. – 2004. – V. 29. – P. 1671–1676. DOI: 10.1016/j.renene.2004.01.008.
8. Oladigbo O. E. *Review on Transparent Conductive Oxides Thin Films deposited by Sol-gel spin coating technique* / O. E. Oladigbo, O. Adedokun, Y. K. Sanusi // International Journal of Engineering Science and Application. – 2018. – V. 2. – P. 88–97. <https://dergipark.org.tr/en/pub/ijesa/issue/39397/427973>.
9. Joshi S. M. *Effect of annealing atmosphere (Ar vs. air) and temperature on the electrical and optical properties of spin-coated colloidal indium tin oxide films* / S. M. Joshi, R. A. Gerhardt // Journal of Materials Science. – 2013. – V. 48. – P. 1465–1473. DOI: 10.1007/s10853-012-6900-6.
10. Jeong J. A. *Ink-jet printed transparent electrode using nano-size indium tin oxide particles for organic photovoltaics* / J. A. Jeong, J. Lee, H. Kim, H. K. Kim, S. I. Na // Solar Energy Materials and Solar Cells. – 2010. – V. 94. – P. 1840–1844. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2010.05.052>.
11. Tahar R. B. H. *Tin doped indium oxide thin films: electrical properties* / R. B. H. Tahar, Y. Ohya T. Ban, Y. Takahashi // J. Appl. Phys. – 1998. – V. 83. – P. 2631–2645. DOI: 10.1063/1.367025.
12. Chen Z. *High mobility indium tin oxide thin film and its application at infrared wavelengths: model and experiment* / Z. Chen, Y. Zhuo, W. Tu, Z. Li, X. Ma, Y. Pei, G. Wang // Optics Express. – 2018. – V. 26. – P. 22123–22134. <https://doi.org/10.1364/OE.26.022123>.
13. Panasyuk M. R. *Manufacturing technology, optical and spectral properties of nano-structured thin zno films* / M. R. Panasyuk, B. I. Turko, V. B. Kapustianyk, G. O. Lubochkova, V. P. Rudyk, A. P. Vas'kiv, V. M. Davydov // Functional Mater. – 2005. – V. 12. – P. 746–749. <http://functmaterials.org.ua/contents/12-4/fm124-26.pdf>.
14. Turko B. *Effect of dopant concentration and crystalline structure on the absorption edge in ZnO:Y films* / B. Turko, U. Mostovoy, M. Kovalenko, Y. Eliyashevskiy, Y. Kulyk, O. Bovgyra, V. Dzikovskiy, A. Kostruba, R. Vlokh, V. Savaryn, V. Stybel, B. Tsizh, S. Majevska // Ukr. J. Phys. Opt. – 2021. – V. 22. – P. 31–37. doi: 10.3116/16091833/22/1/31/2021.
15. Lee K.-S. *A study on transparent electrode properties of indium tin oxide thin films deposited from recycled target* / K.-S. Lee, Y. J. Mo, I. K.

- Park, T.-S. Park, Y. S. Kim // Bull. Korean Chem. Soc. – 2020. – V. 41. – P. 341–347. <https://doi.org/10.1002/bkcs.12000>.
16. *Sputtered Indium Tin Oxide Films for Optoelectronic Applications*. Chapter 14 in book: Optoelectronics – Advanced Device Structures / O. Malik and F. J. de la Hidalga-Wade. – Rijeka : IntechOpen CY, 2017. – 372 p. <http://dx.doi.org/10.5772/67441>.
17. Fikry M. *Superior control for physical properties of sputter deposited ITO thin-films proper for some transparent solar applications* / M. Fikry, M. Mohie, M. Gamal, A. Ibrahim, G. Genidy // Optical and Quantum Electronics. – 2021. – V. 53. – P. 122 (16 pp). <https://doi.org/10.1007/s11082-021-02770-w>.
18. Khusayfan N. M. *Study of Structure and Electro-Optical Characteristics of Indium Tin Oxide Thin Films* / N. M. Khusayfan, M. M. El-Nahass // Advances in Condensed Matter Physics. – 2013. – V. 2013. – P. 408182 (8 pp). <http://dx.doi.org/10.1155/2013/408182>.
19. Txintxurreta J. *Indium Tin Oxide Thin Film Deposition by Magnetron Sputtering at Room Temperature for the Manufacturing of Efficient Transparent Heaters* / J. Txintxurreta, E. G. Berasategui, R. Ortiz, O. Hernández, L. Mendizábal, J. Barriga // Coatings. – 2021. – V. 11. – P. 92 (14 pp). <https://doi.org/10.3390/coatings11010092>.
20. Al-Dahoudi N. *Wet Coating Deposition of ITO Coatings on Plastic Substrates* / N. Al-Dahoudi, M. A. Aegerter // Journal of sol-gel science and technology. – 2003. – V. 26. – P. 693–697. <https://doi.org/10.1023/A:1020777500940>
21. Wiboonsak S. *Simple ITO Surface Treatments Induced Better Performance for Low Cost Organic Solar Cells* / S. Wiboonsak, K. Lohawet, B. A. T. Duong, P. Kumnorkaew, W. Koetnuyom // Chiang Mai J. Sci. – 2018. – V. 45. – P. 2178–2189. <https://epg.science.cmu.ac.th/ejournal/journal-detail.php?id=9410>
22. Santos E. R. *Low cost UV-ozone reactor mounted for treatment of electrode anodes used in P-OLEDs devices* / E. R. Santos, J. I. Balbino de Moraes, C. M. Takahashi, V. Sonnenberg, E. C. Burini, S. Yoshida, H. G. Takimoto, R. K. Onmori, W. S. Hui // Polímeros. – 2016. – V. 26. – P. 236–241. <http://dx.doi.org/10.1590/0104-1428.2257>
23. So S. K. *Surface preparation and characterization of indium tin oxide substrates for organic electroluminescent devices* / S. K. So, W. K. Choi, C. H. Cheng, L. M. Leung, C. F. Kwong // Appl. Phys. A. – 1999. – V. 68. – P. 447–450. DOI 10.1007/s003399900968
24. Kim B.-S. *UV-Ozone Surface Treatment of Indium-Tin-Oxide in Organic Light Emitting Diodes* / B.-S. Kim, D.-E. Kim, Y.-K. Jang, N.-S. Lee, O.-K. Kwon, Y.-S. Kwon // Journal of the Korean Physical Society. – 2007. – V. 50. – P. 1858–1861.
25. Kim S. Y. *Effect of ultraviolet-ozone treatment of indium-tin-oxide on electrical properties of organic light emitting diodes* / S. Y. Kim, J.-L. Lee, K.-B. Kim, Y.-H. Tak // J. Appl. Phys. – 2014. – V. 95. – P. 2560–2563. <https://doi.org/10.1063/1.1635995>
26. Destruel P. *Influence of indium tin oxide treatment using UV-ozone and argon plasma on the photovoltaic parameters of devices based on organic discotic materials* / P. Destruel, H. Bock, I. Seguy, P. Jolinat, M. Oukachmih, E. Bedel-Pereira // Polym. Int. – 2006. – V. 55. – P. 601–607. DOI: 10.1002/pi.1947
27. Aleksandrova M. P. *Influence of UV Treatment on the Electrooptical Properties of Indium Tin Oxide Films Used in Flexible Displays* / M. P. Aleksandrova, I. N. Cholakova, G. K. Bodurov, G. D. Kolev, G. H. Dobrikov // World Academy of Science, Engineering and Technology. – 2012. – V. 71. – P. 1271–1274. [doi.org/10.5281/zenodo.1080816](http://dx.doi.org/10.5281/zenodo.1080816)
28. Bhatti M. T. *Effect of Annealing on Electrical Properties of Indium Tin Oxide (ITO) Thin Films* / M. T. Bhatti, A. M. Rana, A. F. Khan, M. I. Ansari // Pakistan Journal of Applied Sciences. – 2002. – V. 2. – P. 570–573. DOI: 10.3923/jas.2002.570.573
29. Plumley J. B. *Crystallization of electrically conductive visibly transparent ITO thin films by wavelength-range-specific pulsed Xe arc lamp annealing* / J. B. Plumley, A. W. Cook, C. A. Larsen, K. Artyushkova, S. M. Han, T. L. Peng, R. A. Kemp // Journal of Materials Science. – 2018. – V. 53. – P. 12949–12960. Web. doi: 10.1007/s10853-018-2534-7.
30. Toporovska L. *Zinc oxide: reduced graphene oxide nanocomposite film for heterogeneous photocatalysis* / L. Toporovska, B. Turko, M. Savchak, M. Seyedi, I. Luzinov, A. Kostruba, V. Kapustianyk, A. Vaskiv // Optical and Quantum Electronics. – 2020. – V. 52. – P. (12 pp). DOI 10.1007/s11082-019-2132-1.