

## НИЗЬКОТЕМПЕРАТУРНА ТЕХНОЛОГІЯ ОТРИМАННЯ ПРОЗОРИХ ПЛІВОК ОКСИДУ ІНДІЮ-ОЛОВА З ВИСОКОЮ ПРОВІДНІСТЮ

Б. Турко<sup>1</sup>, В. Васільєв<sup>1</sup>, Ю. Еліяшевський<sup>1</sup>, М. Рудко<sup>1</sup>, Н. Швець<sup>1</sup>,  
А. Васьків<sup>1</sup>, Л. Грицак<sup>1</sup>, В. Капустяник<sup>1</sup>, А. Коструба<sup>2</sup>, С. Семак<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Львівський національний університет імені Івана Франка, вул. Драгоманова, 50, Львів, 79005, Україна,

<sup>2</sup> Львівський національний університет ветеринарної медицини та біотехнологій імені С. З. Гжизького,  
вул. Пекарська, 50, Львів, 79010, Україна,

e-mail: tyrko\_borys@ukr.net

(Отримано 01 квітня 2022 р.; в остаточному вигляді — 18 серпня 2022 р.; прийнято до друку — 05 вересня 2022 р.;  
опубліковано онлайн — 03 листопада 2022 р.)

Досліджено вплив низькотемпературного відпалу (до 150°C) та опромінення світлом від кварцової ртутної лампи (протягом часу до 20 хв) на структурні, оптичні та електричні властивості плівок оксиду індію-олова товщиною 0.8 мкм, осаджених методом високочастотного магнетронного розпилення на оптично прозорі скляні підкладки без підігріву. Встановлено, що низькотемпературний відпал протягом однієї години та короткотривале опромінення світлом кварцової ртутної лампи спричиняють зростання середніх розмірів кристалітів, середньоквадратичної шорсткості поверхні, зменшення величини питомого електроопору плівок оксиду індію-олова, а також підвищення оптичної прозорості й, відповідно, пониження величини коефіцієнта відбивання у видимому діапазоні спектра. Наведені результати можуть бути корисними в інженерії електронних пристроїв на основі матеріалів із низькою термостійкістю.

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

DOI: <https://doi.org/10.30970/jps.26.4402>

### I. ВСТУП

Датою народження терміна “прозора електроніка” вважають 1997 рік, коли в журналі “Nature” вийшла стаття японського дослідника Кавазое (Kawazoe) зі співавторами. У ній йшлося про отримання прозорої високопровідної оксидної плівки  $\text{CuAlO}_2$  із р-типом провідності. У тому ж числі “Nature” була надрукована праця Томаса (Thomas), у якій на основі результатів робіт Кавазое обговорювали можливість створення так званих невидимих електронних кіл, що забезпечать нові перспективи застосування оксидних матеріалів, які до цього використовували тільки як пасивні елементи електронних схем [1, 2].

Головними напрямками застосування прозорої електроніки є сенсорні дисплеї, гнучкі дисплеї, органічні світлодіоди (OLED), електролюмінесцентні випромінювачі, тонкоплівкові фотовольтаїчні елементи, різні електронні й оптичні покриття для інших пристроїв функціональної електроніки [3].

Оксид індію-олова (ІТО, 10 ваг. %  $\text{SnO}_2$ ) — провідний оксидний матеріал, який тепер найширше використовують у сучасних електронних і сенсорних пристроях. Незважаючи на високу ціну цього матеріалу (приблизно 1 000 дол. США за 1 кг) та наявні альтернативи, він досі зберігає свої панівні позиції на ринку прозорих провідних покриттів [3].

Наукове зацікавлення плівками ІТО стабільно високе. Їх отримують різноманітними методами, зокрема електронно-променевим випаровуванням [4], термічним вакуумним випаровуванням [5], магнетронним розпиленням на сталому струмі [6], імпульсним лазерним осадженням [6], високочастотним (ВЧ) магнетронним розпиленням [7], реактивним розпилен-

ням [8], спреї-піролізом [9], золь-гель методом [10], центрифугуванням [11], методом струменевого друку [12], хімічним вакуумним осадженням [13], метал-органічним хімічним вакуумним осадженням [14] тощо. Магнетронне ВЧ-розпилення є одним з найкращих методів виготовлення тонких оксидних плівок. Перевагами методу є його придатність для розпилення тугоплавких матеріалів, універсальність і відносно низька вартість. Ефективність магнетронного ВЧ-розпилення зумовлена високою активністю молекул газової компоненти, яка стимулюється дією ВЧ-плазми [15, 16].

Більшість наявних у цьому напрямі публікацій присвячена дослідженням впливу технологічних параметрів отримання й подальшого оброблення на оптико-електричні властивості плівок ІТО. Зокрема, уже встановлено, що підвищити електропровідність та оптичну прозорість плівок ІТО можна термічним відпалом за температур, вищих від 200°C [17–20].

Є низка електронних пристроїв, чутливих до температури, з оптично прозорими електродами. Тому на різних етапах їх виготовлення температура не повинна перевищувати 100°C. Отримання конкурентоспроможних високоякісних плівок ІТО на основі низькотемпературних технологій у промислових масштабах усе ще залишається проблемою, яку намагаються розв'язати, зокрема з використанням магнетронного розпилення [21].

Плівки ІТО, як оптично прозорі обігрівачі, можна застосовувати для швидкого й надійного нагрівання скляних і пластикових компонентів (вітрового скла, фар тощо) у різних транспортних засобах для подолання запотівання та/або обледеніння в суворих кліматичних умовах з метою підвищення ефективно-



сті використовуваних на сьогодні засобів. Наприклад, вітрові скла сучасних автомобілів ламінують полімерною плівкою з полівінілбутиралу (PVB), яка містить вольфрамові мікродропи як нагрівальний елемент. Однак цей тип підігріву демонструє недостатню прозорість та однорідність розподілу тепла по вітровому склі [21]. Зовнішні лінзи в нових автомобільних світлодіодних фарах також зазнають запотівання або замерзання через конденсацію вологи, що виникає всередині лінзи. Зазвичай корпуси фар мають вентиляційні отвори з фільтрами для рециркуляції повітря та запобігання утворенню конденсату, кількість і положення яких необхідно часто змінювати після виготовлення фар для оптимізації рециркуляції повітря, що є складним та дорогим процесом [21]. Це стало складною проблемою з погляду забезпечення видимості та запобігання небезпеці для багатьох виробників оригінального обладнання. Як і у випадку з вітровим склом, мікродропи також зазвичай використовують як нагрівальні елементи, створюючи перешкоди автомобільним системам радіо- чи світловиявлення та визначення дальності (RADAR та LIDAR). Оптично прозорі електропровідні покриття можуть поліпшити експлуатаційні характеристики звичайних нагрівальних елементів, демонструючи високу теплоємність зі швидким регулюванням температури та малу теплову інерцію без шкоди для їх оптичного пропускання [21].

Опромінення ультрафіолетовим (УФ) світлом використовують для очищення поверхонь плівок ІТО від карбонових сполук та зміни співвідношення в кількості поверхневих атомів In, Sn та O, що збільшує вихід електронів з ІТО [22–29]. Збільшення виходу електронів з ІТО корисне, оскільки завдяки цьому знижується інтерфейсний бар'єр і підвищується ефективність інжекції дірок з ІТО в органічний шар, тобто поліпшується робота органічних сонячних елементів та органічних світлодіодів [23–29].

Кількість публікацій щодо комплексних досліджень впливу низькотемпературного відпалу [30] чи опромінення світлом на структурні, оптичні та електричні властивості плівок ІТО [29, 31] є незначним. Тому в цій статті наведено результати наших досліджень, присвячених розв'язанню вказаної наукової й технологічної задачі.

## II. ЕКСПЕРИМЕНТ

Плівки ІТО отримано методом магнетронного ВЧ-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 приблизно дорівнювала 0.8 мкм.

Частина плівок ІТО відпалювали на повітрі протягом 1 години за різних температур у муфельній електропечі “CNOL-0,2/1250” (Umega Group AB, м. Утена, Литва). Іншу частину зразків опромінювали протягом різних проміжків часу світлом від кварцової ртутної лампи ДРТ-125 потужністю 125 Вт, розташованої на відстані 10 см від поверхні тонкоплівкових зразків [32].

Морфологію поверхні експериментальних зразків вивчали атомно-силовим мікроскопом Solver P47-PRO. Вимірювали еліпсометрію *ex situ* еліпсометром ЛЕФ-3М. Джерелом світла був He-Ne-лазер ( $\lambda = 632.8$  нм).

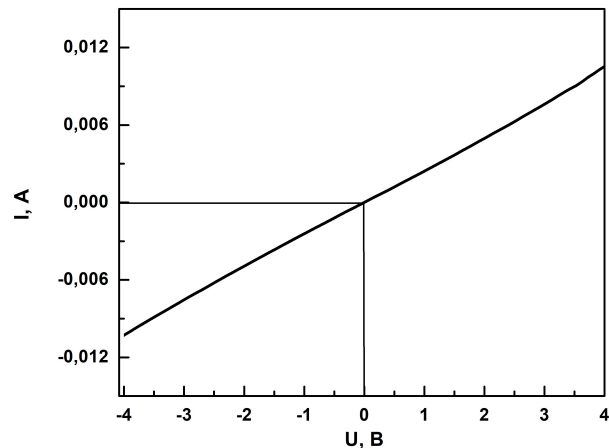


Рис. 1. Вольт-амперна характеристика відпаленої за 150°C тонкої плівки ІТО зі срібними контактами

Fig. 1. Volt-ampere characteristic of a thin ITO film with silver contacts annealed at 150°C

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” із входною щільною 25 мкм, із дифракційною ґраткою 300 штр./мм. Детектування світла в спектрометрі здійснюється ПЗЗ-матрицею на 2048 пікселів. Для автоматизованого комп'ютерного керування спектрометром й опрацювання спектрів застосовували спеціальне програмне забезпечення. Використовували 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) [20, 33]. Використовували срібні тонкоплівкові електроди, осаджені термічним вакуумним випаровуванням у вакуумному універсальному пості ВУП-5М (ВАТ “SELMI”, м. Суми, Україна). Омічна природа контактів цих електродів зі зразком підтверджується відповідною вольт-амперною характеристикою (рис. 1).

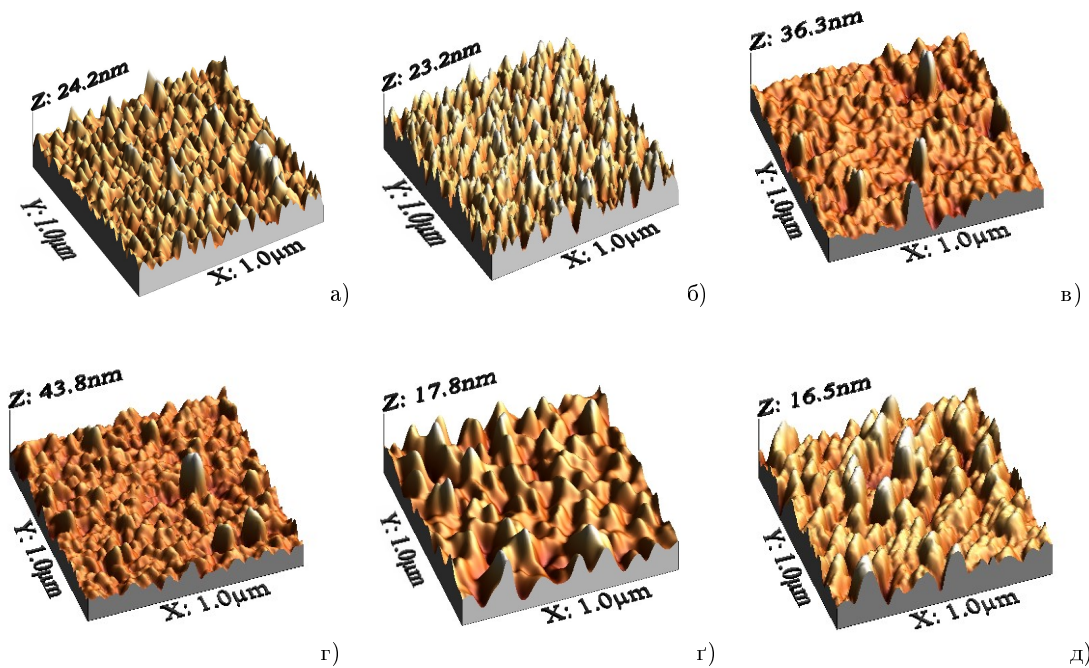


Рис. 2. Тривимірні зображення плівок ІТО: а) без відпалу й опромінення світлом лампи ДРТ-125; б) відпаленої за 50°C; в) відпаленої за 100°C; г) відпаленої за 150°C; г) після 5 хв опромінення світлом лампи ДРТ-125; д) після 20 хв опромінення світлом лампи ДРТ-125

Fig. 2. Three-dimensional images of ITO films: a) without annealing and irradiation with the DRT-125 light; b) annealed at 50°C; c) annealed at 100°C; d) annealed at 150°C; e) after 5-minutes irradiation with the light of the DRT-125 lamp; e) after 20-minutes irradiation with the light of the DRT-125 lamp

### III. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТУ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Із використанням атомно-силової мікроскопії отримано інформацію про морфологію поверхні плівок ІТО (рис. 2). Зокрема, обчислено такі параметри поверхні, як середньоквадратична шорсткість і середній розмір кристалітів (табл. 1).

Із підвищенням температури відпалу зростають розміри кристалітів у плівках. Освітлення кварцовою ртутною лампою також спричинило структурну перебудову плівок ІТО. Унаслідок опромінення дещо зросли розміри кристалітів, що узгоджується з дани-

ми робіт [29, 31]. Автори праці [29] здійснювали 10-хвилинне опромінення плівок ІТО УФ- світлом із довжиною хвилі 365 нм від 250 Вт джерела, тоді як в роботі [31] плівки ІТО опроміювали світлом від імпульсної дугової ксенонової лампи, яка була на віддалі в 22 мм від зразка. Тривалість опромінення становила 20 с (20 циклів із коротким проміжком часу між ними для охолодження, кожен цикл складався з 8 імпульсів; тривалість імпульсів дорівнювала 200 мкс, проміжок між імпульсами — 75 мкс, інтенсивність першого імпульсу — 35 кВт/см<sup>2</sup>, другого — 26 кВт/см<sup>2</sup>, третього — 22 кВт/см<sup>2</sup>, четвертого — 18 кВт/см<sup>2</sup>, п'ятого — 15 кВт/см<sup>2</sup>, шостого — 12 кВт/см<sup>2</sup>, сьомого — 10 кВт/см<sup>2</sup>, восьмого — 8 кВт/см<sup>2</sup>).

Зразок	Структура	Температура відпалу, °C	Час опромінення світлом лампи ДРТ-125, хв	Середньоквадр. шорсткість, нм	Середній розмір кристалітів, нм
a	ІТО/скло	—	—	1.5	5.1
б	ІТО/скло	50	—	3.6	12.6
в	ІТО/скло	100	—	3.4	13.4
г	ІТО/скло	150	—	3.9	15.2
г'	ІТО/скло	—	5	1.8	5.5
д	ІТО/скло	—	20	2.4	8.1

Табл. 1. Середньоквадратична шорсткість і середній розмір кристалітів у плівках ІТО, одержаних за різних технологічних умов

Table 1. RMS roughness and average size of crystallites in ITO films obtained under different technological conditions

Згідно з даними роботи [31], у необроблених відпалом чи опроміненніях плітках ІТО є значною аморфна частка, яка складається зі сполук  $\text{InO}_x$ ,  $\text{SnO}$  та атомів  $\text{In}^{0+}$ ,  $\text{Sn}^{0+}$ , які поглинають видиме світло. Під час опромінення видиме світло локально поглинається атомами металів та частково окисленими сполуками. Поглинання збуджує ці частинки, і їхня наступна коливальна релаксація приводить до локального нагрівання місця їх розміщення в плівці [31]. Далі це тепло спричиняє окислення й реакції кристалізації, за яких дрібні кристаліти починають рости в місцях зародкоутворення. Оптично непрозорі вкраплення  $\text{In}^{0+}$  та  $\text{InO}_x$  кристалізуються в оптично прозорий оксид  $\text{In}_2\text{O}_3$ , так само як оптично непрозорі вкраплення  $\text{Sn}^{0+}$  та  $\text{SnO}$  кристалізуються в оптично прозорий оксид  $\text{SnO}_2$ , і ріст кристалітів під дією опромінення видимим світлом припиняється. УФ- та інфрачервоне світло також спричинятиме зростання кристалітів у плівках ІТО, проте водночас відбуватимуться й шкідливі для отримання якісних плівок процеси, як-от: фоторозклад і абляція. Фоторозклад і абляція понижуватимуть електропровідність та оптичну прозорість плівок ІТО [31].

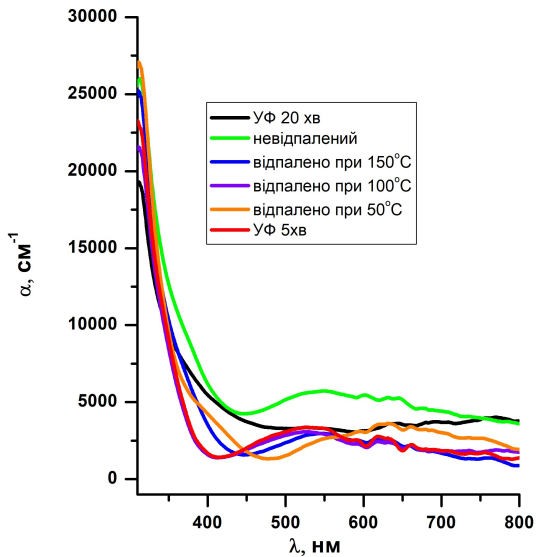


Рис. 3. Спектри поглинання плівок ІТО, отриманих за різних технологічних умов: без відпалу й опромінення світлом лампи ДРТ-125 (зелена лінія); відпаленої за 50°C (оранжева лінія); відпаленої за 100°C (фіолетова лінія); відпаленої за 150°C (синя лінія); після 5 хв опромінення світлом лампи ДРТ-125 (червона лінія); після 20 хв опромінення світлом лампи ДРТ-125 (чорна лінія)

Fig. 3. Absorption spectra of ITO films obtained under different technological conditions: without annealing or irradiation with the light of the DRT-125 lamp (green line); annealed at 50°C (orange line); annealed at 100°C (purple line); annealed at 150°C (blue line); after 5-minutes irradiation with the DRT-125 lamp (red line); after 20-minutes irradiation with the DRT-125 lamp (black line)

На рис. 3 зображено спектри поглинання плівок ІТО, отриманих за різних технологічних умов. Згідно з наведеними спектрами, найнижчу оптичну про-

зорість у видимому діапазоні мали невідпалені й 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.

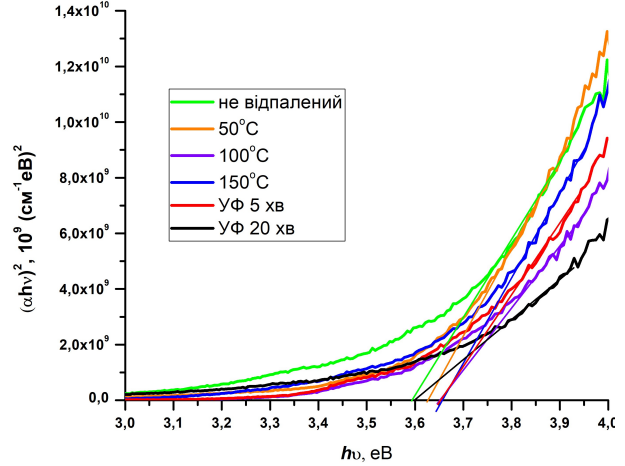


Рис. 4. Спектри поглинання в координатах  $(\alpha h\nu)^2 = f(h\nu)$  плівок ІТО: без відпалу й опромінення світлом лампи (зелена лінія); відпаленої за 50°C (оранжева лінія); відпаленої за 100°C (фіолетова лінія); відпаленої за 150°C (синя лінія); після 5 хв опромінення світлом лампи ДРТ-125 (червона лінія); після 20 хв опромінення світлом лампи ДРТ-125 (чорна лінія)

Fig. 4. Absorption spectra in the coordinates  $(\alpha h\nu)^2 = f(h\nu)$  of ITO films: without annealing or irradiation with the lamp light (green line); annealed at 50°C (orange line); annealed at 100°C (purple line); annealed at 150°C (blue line); after 5-minutes irradiation of the DRT-125 lamp (red line); after 20-minutes irradiation with DRT-125 lamp (black line)

Коефіцієнти поглинання  $\alpha$  розраховували за формулою Бугера–Ламберта–Бера на основі спектрів пропускання. Загалом коефіцієнт поглинання пов'язаний із шириною забороненої зони  $E_g$  відношенням [6, 8, 16, 17, 20]

$$\alpha h\nu = B(h\nu - E_g)^r, \quad (1)$$

де  $r = 1/2$  для прямих дозволених переходів;  $B$  — стала, практично незалежна від енергії фотонів.

Значення оптичної ширини забороненої зони отримано із залежностей  $(\alpha h\nu)^2$  від  $h\nu$  у ділянці високого поглинання з екстраполяцією лінійних ділянок кривих до  $(\alpha h\nu)^2 = 0$  [6, 8, 16, 17, 20].

Аналіз фундаментального краю поглинання за допомогою співвідношення (1) показує, що оптична ширина забороненої зони  $E_g$ : невідпаленої й неопроміненої плівки ІТО приблизно дорівнює 3.59 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. 4). Одержані значення величин  $E_g$  корелюють із даними робіт [8, 17, 34, 35].

Структура	Температура відпалу, °С	Час опромінення світлом лампи ДРТ-125, хв	Питомий опір, Ом·см
ІТО/скло	—	—	Непровідний
ІТО/скло	50	—	80
ІТО/скло	100	—	6
ІТО/скло	150	—	0,03
ІТО/скло	—	5	556
ІТО/скло	—	20	356

Табл. 2. Значення питомого електричного опору плівок ІТО, отриманих за різних технологічних умов  
Table 2. Values of electrical resistivity of ITO films obtained under different technological conditions

На рис. 5 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.

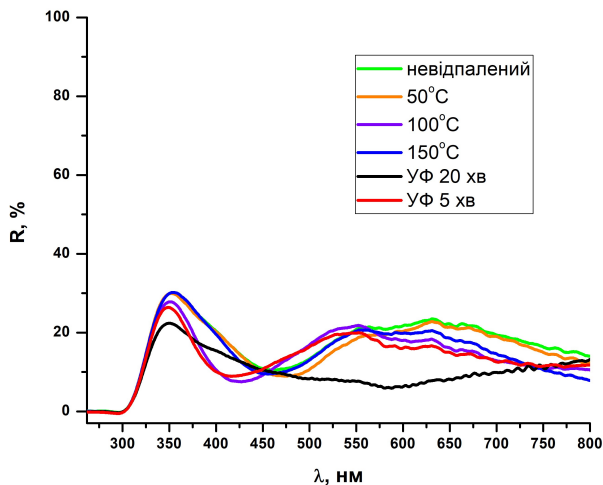


Рис. 5. Спектри відбивання плівок ІТО, одержаних за різних технологічних умов: без відпалу й опромінення світлом (зелена лінія); відпаленої за 50°C (оранжева лінія); відпаленої за 100°C (фіолетова лінія); відпаленої за 150°C (синя лінія); після 5 хв опромінення світлом лампи ДРТ-125 (червона лінія);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

Fig. 5. Reflection spectra of ITO films obtained under different technological conditions: without annealing or light irradiation (green line); annealed at 50°C (orange line); annealed at 100°C (purple line); annealed at 150°C (blue line); after 5-minutes irradiation with the DRT-125 lamp (red line); after 20-minutes irradiation with the DRT-125 lamp (black line)

Значення величин питомого електроопору плівок ІТО, одержаних за різних технологічних умов наведено в табл. 2. Із підвищенням температури відпалу до 150°C та зі збільшенням часу опромінення кварцовою ртутною лампою до 20 хв зафіксовано зменшення величини питомого електроопору, що узгоджується з даними робіт [13, 17, 29, 31, 35–37].

## ВИСНОВКИ

Досліджено вплив 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 магнетронного ВЧ-розпилення на оптично прозорі для довжин хвиль світла, більших за 300 нм, скляні підкладки. Під час осадження підігріву підкладок не застосовували.

Установлено, що низькотемпературний відпал протягом однієї години та короткотривале опромінення світлом кварцової ртутної лампи спричиняють збільшення середніх розмірів кристалітів та середньоквадратичної шорсткості поверхні плівок ІТО. Зокрема, після відпалу плівки ІТО за температури 150°C середній розмір кристалітів та середньоквадратична шорсткість поверхні зросли приблизно втричі, а після 20 хв опромінення — приблизно в 1.6 разу відповідно.

Найнижчу оптичну прозорість у видимому діапазоні спектра серед досліджуваних експериментальних зразків мали невідпалені й неопромінені світлом плівки ІТО, а максимальну — відпалені за найвищою температурою (150°C) та опромінені протягом 5 хв світлом від лампи ДРТ-125. Збільшення часу опромінення призводить до зниження оптичної прозорості плівок, що може бути зумовлене зростанням кількості дефектів за рахунок процесів фоторозкладу ІТО й абляції.

Термічний відпал та опромінення світлом кварцової ртутної лампи знижують коефіцієнт відбивання плівок ІТО у видимому діапазоні спектра. На основі проведеного аналізу спектрів оптичного поглинання плівок ІТО виявлено зростання величини їхньої оптичної ширини забороненої зони з 3.59 eV для невідпаленої плівки й аж до 3.66 eV з підвищенням температури відпалу до 150°C. Натомість залежність величини оптичної ширини забороненої зони плівок ІТО від часу опромінення світлом кварцової ртутної лампи є не тривіальною. Опромінення плівок ІТО світлом кварцової ртутної лампи протягом 5 хв спричиняє зростання  $E_g$  з 3.59 eV до 3.65 eV, тоді як уже після 20 хв опромінення  $E_g$  знижується до 3.60 eV. Це пов'язано зі змінами концентрації структурних дефектів: її зниженням після 5-хвилинного опромінення світлом за

рахунок збільшення розмірів кристалітів та формування оксидних сполук  $\text{In}_2\text{O}_3$  та  $\text{SnO}_2$ , і, відповідно, зростанням після 20 хв опромінення через процеси фоторозкладу й абляції.

Із підвищенням температури відпалу до  $150^\circ\text{C}$  та зі 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 із низькою термостійкістю.

**Подяка.** Ця дослідницька робота була підтримана Міністерством освіти і науки України (грант М/47-2022 “Нові фотовольтаїчні матеріали на основі перовскітів і фероїків”).

- 
- [1] H. Kawazoe *et al.*, *Nature* **389**, 939 (1997); <https://doi.org/10.1038/40087>.
- [2] G. Thomas, *Nature* **389**, 907 (1997); <https://doi.org/10.1038/39999>.
- [3] B. Turko, V. Kapustianyk, *ZnO as Multifunctional Material for Nanoelectronics* (Scholars' Press, Beau Bassin, 2020)
- [4] Y. Shigesato, I. Yasui, D. C. Paine, *JOM* **47**, 47 (1995); <https://doi.org/10.1007/BF03221436>.
- [5] A. H. Sofi, M. A. Shah, K. Asokan, *J. Electron. Mater.* **47**, 1344 (2018); <https://doi.org/10.1007/s11664-017-5915-9>.
- [6] J. Kim *et al.*, *Sci. Rep.* **10**, 12486 (2020); <https://doi.org/10.1038/s41598-020-69463-4>.
- [7] A. Hacini, A. H. Ali, N. N. Adnan, *Opt. Mater.* **120**, 111411 (2021); <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2021.111411>.
- [8] K. P. Sibinet *et al.*, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* **145**, 314 (2016); <http://dx.doi.org/10.1016/j.solmat.2015.10.035>.
- [9] M. Rozati, T. Ganj, *Renew. Energy* **29**, 1671 (2004); <https://doi.org/10.1016/j.renene.2004.01.008>.
- [10] O. E. Oladigbo, O. Adedokun, Y. K. Sanusi, *Int. J. Eng. Res. Appl.* **2**, 88 (2018); <https://doi.org/10.1080/09500839.2020.1760389>.
- [11] S. M. Joshi, R. A. Gerhardt, *J. Mater. Sci.* **48**, 1465 (2013); <https://doi.org/10.1007/s10853-012-6900-6>.
- [12] J. A. Jeong, J. Lee, H. Kim, H.K. Kim, S.I. Na, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* **94**, 1840 (2010); <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2010.05.052>.
- [13] R. B. H. Tahar, Y. Ohya, T. Ban, Y. Takahashi, *J. Appl. Phys.* **83**, 2631 (1998); <https://doi.org/10.1063/1.367025>.
- [14] Z. Chen *et al.*, *Opt. Express* **26**, 22123 (2018); <https://doi.org/10.1364/OE.26.022123>.
- [15] M. R. Panasyuk *et al.*, *Funct. Mater.* **12**, 746 (2005); <http://functmaterials.org.ua/contents/12-4/fm124-26.pdf>.
- [16] B. Turko *et al.*, *Ukr. J. Phys. Opt.* **22**, 31 (2021); <https://doi.org/10.3116/16091833/22/1/31/2021>.
- [17] K.-S. Lee, Y. J. Mo, I. K. Park, T.-S. Pa Bull, *Korean Chem. Soc.* **41**, 341 (2020); <https://doi.org/10.1002/bkcs.12000>.
- [18] O. Malik, F. J. de la Hidalga-Wade, *Optoelectronics — Advanced Device Structures* (IntechOpen CY, Rijeka, 2017); <https://doi.org/10.5772/67441>.
- [19] M. Fikry, M. Mohie, M. Gamal, A. Ibrahim, G. Genidy, *Opt. Quantum Electron.* **53**, 122 (2021); <https://doi.org/10.1007/s11082-021-02770-w>.
- [20] N. M. Khusayfan, M. M. El-Nahass, *Adv. Condens. Matter Phys.* **2013**, 408182 (2013); <https://doi.org/10.1155/2013/408182>.
- [21] J. Txintxurreta *et al.*, *Coatings* **11**, 92 (2021); <https://doi.org/10.3390/coatings11010092>.
- [22] N. Al-Dahoudi, M.A. Aegerter, *J. Solgel Sci. Technol.* **26**, 693 (2003); <https://doi.org/10.1023/A:1020777500940>.
- [23] S. Wiboonsak, K. Lohawet, B. A. T. Duong, P. Kumnor-kaew, W. Koetniyom, Chiang Mai J. Sci. **45**, 2178 (2018).
- [24] E. R. Santos, *Polimeros* **26**, 236 (2016); <https://doi.org/10.1590/0104-1428.2257>.
- [25] S. K. So, W. K. Choi, C. H. Cheng, L. M. Leung, C. F. Kwong, *Appl. Phys. A* **68**, 447 (1999); <https://doi.org/10.1007/s003399900968>.
- [26] B.-S. Kim *et al.*, *J. Korean Phys. Soc.* **50**, 1858 (2007).
- [27] S. Y. Kim, J.-L. Lee, K.-B. Kim, Y.-H. Tak J, *Appl. Phys.* **95**, 2560 (2004); <https://doi.org/10.1063/1.1635995>.
- [28] P. Destruel *et al.*, *Polym. Int.* **55**, 601 (2006); <https://doi.org/10.1002/pi.1947>.
- [29] M. P. Aleksandrova, I. N. Cholakova, G. K. Bodurov, G. D. Kolev, G. H. Dobrikov, *World Acad. Sci. Eng. Technol.* **71**, 1271 (2012); <https://doi.org/10.5281/zenodo.1080816>.
- [30] M. T. Bhatti, A. M. Rana, A. F. Khan, M. I. Ansari, *Pak. J. Eng. Appl. Sci.* **2**, 570 (2002); <https://doi.org/10.3923/jas.2002.570.573>.
- [31] J. B. Plumley, *J. Mater. Sci.* **53**, 12949 (2018); <https://doi.org/10.1007/s10853-018-2534-7>.
- [32] L. Toporovska *et al.*, *Opt. Quantum Electron.* **52**, 21 (2020); <https://doi.org/10.1007/s11082-019-2132-1>.
- [33] G. Rietveld, *IEEE Trans. Instrum. Meas.* **52**, 449 (2003); <https://doi.org/10.1109/TIM.2003.809917>.
- [34] C. Guillen, J. Herrero, *Vacuum* **80**, 616 (2006); <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2005.10.006>.
- [35] S.-C. Her, C.-F. Chang, *J. Appl. Biomater. Funct. Mater.* **15**, 170 (2017); <https://doi.org/10.5301/jabfm.5000345>.
- [36] N. M. Ahmed *et al.*, *Results Phys.* **13**, 102159 (2019); <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2019.102159>.
- [37] H. Kim *et al.*, *Appl. Phys. Lett.* **74**, 3444 (1999); <https://doi.org/10.1063/1.124122>.

**LOW-TEMPERATURE TECHNOLOGY FOR OBTAINING TRANSPARENT ITO FILMS WITH HIGH CONDUCTIVITY**

B. Turko<sup>1</sup>, V. Vasiliev<sup>1</sup>, Y. Eliyashevskyy<sup>1</sup>, M. Rudko<sup>1</sup>, N. Shvets<sup>1</sup>, A. Vaskiv<sup>1</sup>, L. Hrytsak<sup>1</sup>, V. Kapustianyk<sup>1</sup>,  
A. Kostruba<sup>2</sup>, S. Semak<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Ivan Franko National University of Lviv, 50, Drahomanov St., Lviv, UA-79005, Ukraine,*

<sup>2</sup>*Stepan Gzhytskyi National University of Veterinary Medicine and Biotechnologies Lviv,  
50, Pekarska St., UA-79010, Lviv, Ukraine*

The paper reports the effect of low-temperature annealing (up to 150°C) and light irradiation from a quartz mercury lamp (up to 20 min) on the structural, optical, and electrical properties of Indium tin oxide (ITO) films. 0.8 μm thick ITO films were obtained by RF magnetron sputtering of a commercial target on the optically transparent glass substrates in an argon atmosphere without heating. Information about the morphology of the ITO films' surface was obtained and the surface parameters were calculated using the method of atomic force microscopy.

It has been found that the low temperature annealing for one hour and short-term irradiation with a quartz mercury lamp lead to an increase in the average size of crystallites and root-mean-square (RMS) surface roughness, a decrease in the resistivity of ITO films as well as an increase in the optical transparency in the visible spectral range. After annealing the ITO film at 150°C, the average crystallite size and RMS roughness of the surface increased approximately three times, and after 20 min irradiation — approximately 1.6 times, respectively.

The lowest optical transparency in the visible spectral range among the studied experimental samples was found to be for the non-annealed and non-irradiated ITO films, whereas the highest — for the samples annealed at the highest temperature (150°C) and irradiated for 5 min with the light from the DRT-125 lamp. On the basis of the analysis of optical absorption spectra of ITO films, we detected an increase in their optical band gap from 3.59 eV for the unannealed film up to 3.66 eV with an increase in the annealing temperature of the samples up to 150°C. The resistivity of ITO films decreases with an increase in the annealing temperature up to 150°C and with an increase in the irradiation time with a light of the quartz mercury lamp up to 20 minutes.

These results may be useful in the engineering of electronic devices based on the materials of low thermal stability.

**Key words:** indium tin oxide, thin films, absorption spectra, reflection spectra, crystal structure, electrical resistance.