

Л. Грицак<sup>1</sup>, Б. Турко<sup>1</sup>, В. Васільєв<sup>1</sup>, Ю. Еліяшевський<sup>1</sup>, А. Коструба<sup>2</sup>, А. Грицак<sup>1</sup>

## Вплив легування ітрієм на фотокаталітичні властивості плівок ZnO

<sup>1</sup>Львівський національний університет імені Івана Франка, Львів, Україна;

<sup>2</sup>Львівський національний університет ветеринарної медицини та біотехнологій імені Степана Гжицького,  
м. Львів, Україна

Плівки цинк оксиду з різним рівнем легування ітрієм синтезували на скляних підкладках за допомогою технології високочастотного магнетронного розпилення. Для вагових концентрацій Y: 0; 2,4; 3,9; 4,7 ваг. % були досліджені фотокаталітичні властивості плівок ZnO:Y. В результаті досліджень продемонстровано збільшення фотокаталітичної активності плівок при застосуванні легування ітрієм. Виявлено, що ZnO : Y 3,9 ваг. % демонструє найвищу ефективність розкладання – 100 % за 80 хвилин, і найбільшу константу швидкості реакції  $9,6 \cdot 10^{-2} \text{ хв}^{-1}$  серед усіх зразків.

**Ключові слова:** оксид цинку, фотокаталіз, фотодеградація, спектр поглинання.

Отримано 21 грудня 2022; Прийнято 12 липня 2023.

### Вступ

Основною проблемою всього світу є забруднення води через низку причин, таких як неадекватне очищення стічних вод, промислові відходи, морські скидання, радіоактивні відходи, сільськогосподарські пестициди, тощо [1]. Забруднення води має негативний вплив на навколишнє середовище, а також може призвести до забруднення повітря, що спричинить дуже небезпечні наслідки для здоров'я людини.

Фотокаталіз має великий потенціал щодо застосування для очищення води, оскільки реалізується з: низькими витратами на технологію, високою ефективністю видалення забруднюючих речовин і можливістю повторного використання. В останні роки все більша увага серед напівпровідникових матеріалів у гетерогенному фотокаталізі приділяється ZnO [2]. Крім того, при легуванні йонами металу ZnO було підтверджено посилення фотокаталітичної деградації органічних барвників. Існує велика кількість публікацій по фотокаталізу ZnO легуваного різними металами [3-11]. Але, незважаючи на великий потенційний

практичний і фундаментальний інтерес, кількість публікацій, що стосуються фотокаталітичних властивостей легуваного ітрієм плівок цинк оксиду, все ще залишається недостатньою [12-17]. Крім того, ми не знайшли публікацій, які б описували фотокаталітичні властивості легуваного ітрієм тонких плівок ZnO, отриманих високочастотним (ВЧ) магнетронним розпиленням. Метод ВЧ магнетронного розпилення є одним з найкращих методів виготовлення тонких оксидних плівок. Перевагами методу є його придатність для розпилення високоплавких матеріалів, універсальність і низька вартість. Ефективність ВЧ магнетронного розпилення обумовлена високою активністю молекул газового компонента, що стимулюється дією ВЧ плазми [18]. Важливою особливістю процесу розпилення є те, що хімічний склад напиленої плівки зазвичай буде таким самим, як і мішені, з якої вона була напилена [19].

У цій роботі представлено результати впливу різних рівнів легування ітрієм (0; 2,4; 3,7; 4,7 ваг. %) на фотокаталітичні властивості тонких плівок ZnO. Плівки ZnO отримано на скляних підкладках за

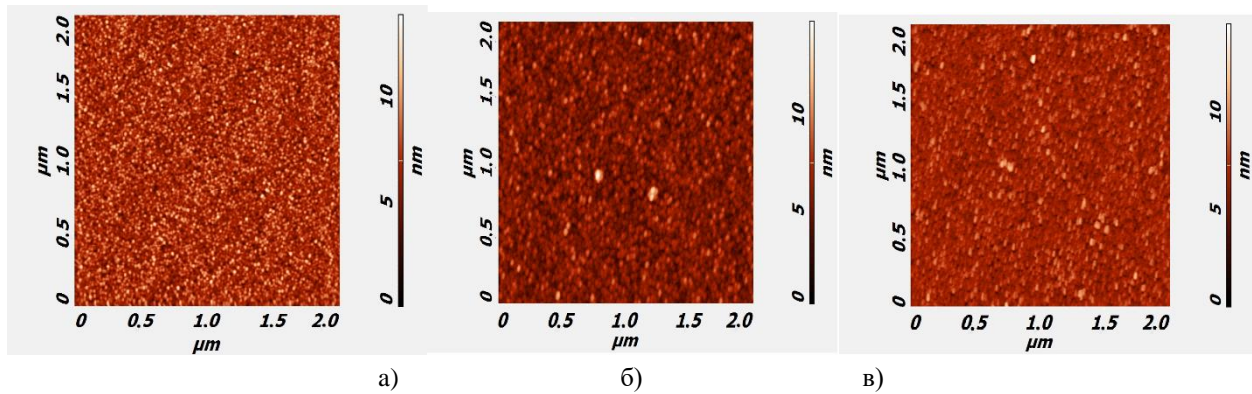


Рис. 1. Тривимірні мікрофотографії атомно-силового мікроскопа, отримані для плівок ZnO:Y з різною концентрацією ітрію: (а) 2,4, (б) 3,9 та (в) 4,7 ваг. %.

допомогою технології ВЧ магнетронного розпилення.

## I. Матеріали і методи

Плівки цинк оксиду з різним рівнем легування ітрієм наносили на скляні підкладки ВЧ магнетронним розпиленням 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 і температури підкладки 300 °С. Мішень виготовили із спресованої суміші порошоків ZnO (марки «хімічно чистий») та Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (марки «чистий»), взятих у відповідних пропорціях [18]. Час розпилення становив 1 годину. Згідно еліпсометричних досліджень товщина плівок становила приблизно 0,6 мкм. Морфологію поверхні зразків вивчали атомно-силовим мікроскопом Solver P47-PRO.

Еліпсометричні вимірювання *ex situ* проводили серійним еліпсометром ЛЕФ-3 М у стандартному компонуванні PCSA (поляризатор–компенсатор–зразок–аналізатор). Джерелом світла був He–Ne лазер ( $\lambda = 632,8$  нм).

Для тестування фотокаталітичних властивостей усіх зразків ZnO легованих Y, метилоранж (C<sub>14</sub>H<sub>14</sub>N<sub>3</sub>NaO<sub>3</sub>S) був обраним моделлю органічного барвника. Досліджуваний зразок у вигляді пластинки розмірами 4,1 × 6 × 1 мм поміщали у стандартну кварцову кювету об'ємом 3,5 мл з водним розчином метилоражу (22 мг/л). Перед освітленням зразок занурювали в розчин метилоражу (МО) приблизно на 20 год. у темряві для досягнення стану адсорбційно-десорбційної рівноваги. Потім розчин МО, що містив зразок, циклічно опромінювали кожні 20 хв. протягом 2 год. кварцовою ртутною лампою ДРТ–125 (з потужністю 125 Вт в ультрафіолетовому та видимому діапазонах довжин хвиль світла, з якої в ультрафіолетовому діапазоні 220 - 400 нм – 70 Вт, і світловим потоком 1850 лм). Необхідна інтенсивність опромінення була досягнута шляхом зміни відстані між лампою і досліджуваним зразком. У цій роботі кювету з розчином МО із зразком розташовували на відстані 5 см від джерела світла.

Оцінку фотокаталітичної ефективності проводили на основі спектрів оптичної густини на максимумі поглинання барвника (465 нм) за допомогою

портативного оптоволоконного спектрометра AvaSpec-ULS2048L-USB2-UA-RS (Avantes BV, м. Апелдорн, Нідерланди). Цей спектрометр також використовувався для дослідження країв поглинання плівок ZnO : Y. Детектування світла в спектрометрі здійснювалося 2048-піксельним CCD детектором. Автоматизоване комп'ютерне керування спектрометром та оброблення спектрів здійснювалося з використанням спеціального програмного забезпечення (AvaSoft 8, м. Апелдорн, Нідерланди).

## II. Результати та обговорення

Аналіз поверхні отриманих нелегованих і легованих ітрієм плівок ZnO проводили за допомогою атомно-силового мікроскопа (АСМ). На Рис. 1 показано АСМ-зображення в масштабі 2×2 мкм<sup>2</sup>, які були використані для отримання середньоквадратичної шорсткості та середнього розміру зерна кожного легованого зразка. Як видно з Таблиці 1, спостерігалася тенденція до зменшення середнього розміру кристалітів із збільшенням концентрації ітрію.

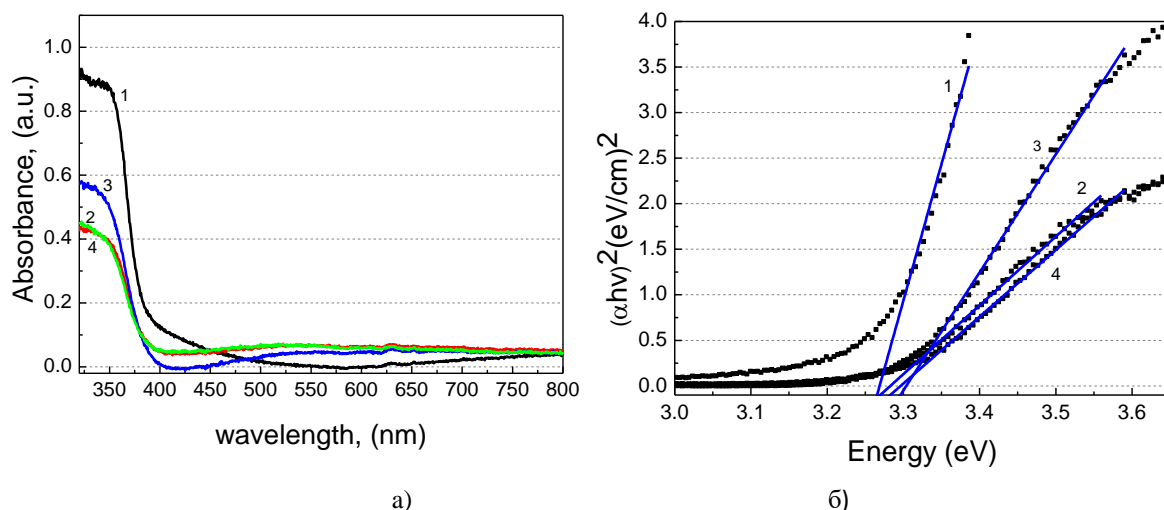
Таблиця 1

Середньоквадратична шорсткість та середній розмір зерен для плівок ZnO:Y як функції концентрації ітрію

Концентрація легування Y, ваг. %	Середньоквадратична шорсткість, нм	Середній розмір зерен, нм
2,4	1,6	6,9
3,9	0,8	6,7
4,7	1,3	5,7

Незважаючи на те, що на зображеннях (б, в) видно кілька більших зерен, їх кількість не є значною щоб впливати на загальний розподіл зерен і шорсткість поверхні. Але при вищій концентрації Y, згідно з даними літератури [18, 20-22], кількість більших зерен стає значною, тоді зростає середній розмір зерна та шорсткість, відповідно.

Очікується, що вивчення оптичної забороненої зони зразка допоможе глибше зрозуміти фотокаталітичні властивості. На Рис. 2а зображено спектри поглинання нелегованої та легованих ітрієм



**Рис. 2.** Спектри поглинання за кімнатної температури плівок ZnO з різним рівнем легування (1: 0 ваг. %; 2: 2,4 ваг. %; 3: 3,9 ваг. %; 4: 4,7 ваг. %), побудовані у координатах а)  $\alpha$  від довжини хвилі та б)  $(\alpha hv)^2$  від  $hv$ .

плівок ZnO при кімнатній температурі. Можна помітити, що легування ітрієм значно впливає на оптичну поведінку плівок. Край поглинання плівок ZnO після легування зміщується в бік менших довжин хвиль світла. Прозорість у видимому діапазоні спектру максимальна для нелегованої плівки ZnO і дещо зменшується з введенням домішки Y. Ці результати добре узгоджуються з даними наведеними в [21, 23].

Для оцінки оптичної забороненої зони ( $E_g$ ) були побудовані залежності спектрів поглинання в координатах  $(\alpha hv)^2$  від  $hv$  на основі співвідношення Тауса [18]:

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

де  $\alpha$  – коефіцієнт поглинання,  $hv$  – енергія фотона,  $B$  – константа, практично незалежна від енергії фотона,  $r$  може приймати значення 1/2, 2, 3/2 і 3, що відповідає дозволеним прямим, дозволеним непрямим, забороненим прямим і забороненим непрямим переходам, відповідно.

У нашому випадку ми маємо справу з прямими дозволеними переходами ( $r = 1/2$ ). Графіки залежності  $(\alpha hv)^2$  від  $hv$  (Рис. 2б), також відомі як графіки Тауса, використовуються для розрахунку ширини забороненої зони фотокаталізаторів.  $E_g$  отримали в результаті перетину дотичної кривої поглинання з віссю X. Значення оптичної забороненої зони для плівок ZnO:Y (0; 2,4; 3,9 і 4,7 ваг. % Y), становили 3,275 еВ, 3,28 еВ, 3,295 еВ і 3,28 еВ, відповідно. Збільшення забороненої зони при збільшенні рівня легування Y до 3,9 ваг. % можна пояснити ефектом Бурштейна–Мосса. Тобто, відбувається блакитний зсув енергій забороненої зони зі збільшенням концентрації йонів Y, подібний до зсувів рівня Фермі зі збільшенням концентрації носіїв, що блокує найнижчі рівні зони провідності та збільшує смугу [15]. Вище за 3,9 ваг. % оптична заборонена зона починає зменшуватися через «появу» енергетичних станів у забороненій зоні поблизу країв

зони [18].

Вплив легування ітрієм на фотокаталітичні властивості вивчали проведенням серії експериментів з різними концентраціями домішок Y (0; 2,4; 3,9 та 4,7 ваг. %) при однакових параметрах фотокаталітичного експерименту. На рисунку 3(а-г) показано фотокаталітичну деградацію МО за 100 хвилин опромінення з використанням як фотокаталізаторів плівок ZnO та ZnO:Y (з 2,4; 3,9 та 4,7 ваг. %).

На Рис. 4а показано зміну концентрації в залежності від часу опромінення з використанням різних фотокаталізаторів. Ефективність знебарвлення водного розчину МО можна розрахувати за співвідношенням [12]:

$$Ef_{Dec} = \frac{C_0 - C_t}{C_0} \times 100\%, \quad (2)$$

де  $C_t$  – це відношення пікової інтенсивності, розраховане для різних зразків після додавання МО та опромінення ультрафіолетом протягом 20 хв., а  $C_0$  встановлено на 100 для еталонної пікової інтенсивності, виміряної для розчину МО без будь-якого опромінення.

Ефективність розкладання барвника становила 73,3; 92,8; 99,8 та 88,5 % для плівок ZnO з концентрацією Y: 0; 2,4; 3,9 та 4,7 ваг. % відповідно, за 60 хвилин УФ-опромінення (Рис. 4б). Як видно, фотокаталітична ефективність фотокаталізаторів ZnO, легованих Y, зростає зі збільшенням концентрації Y від 2,4 ваг. % до 3,9 ваг. %. Подальше збільшення концентрації Y призводило до зниження ефективності фотокаталізатора

Ці результати добре узгоджуються з нашими даними по краю поглинання плівок ZnO:Y. До того моменту, поки виконується ефект Бурштейна–Мосса, тобто до того часу поки відбувається збільшення оптичної забороненої зони, доти відбувається покращення фотокаталітичних властивостей. Крім того, згідно зі статтею [14] ітрії відіграє значну роль

Вплив легування ітрієм на фотокаталітичні властивості плівок ZnO

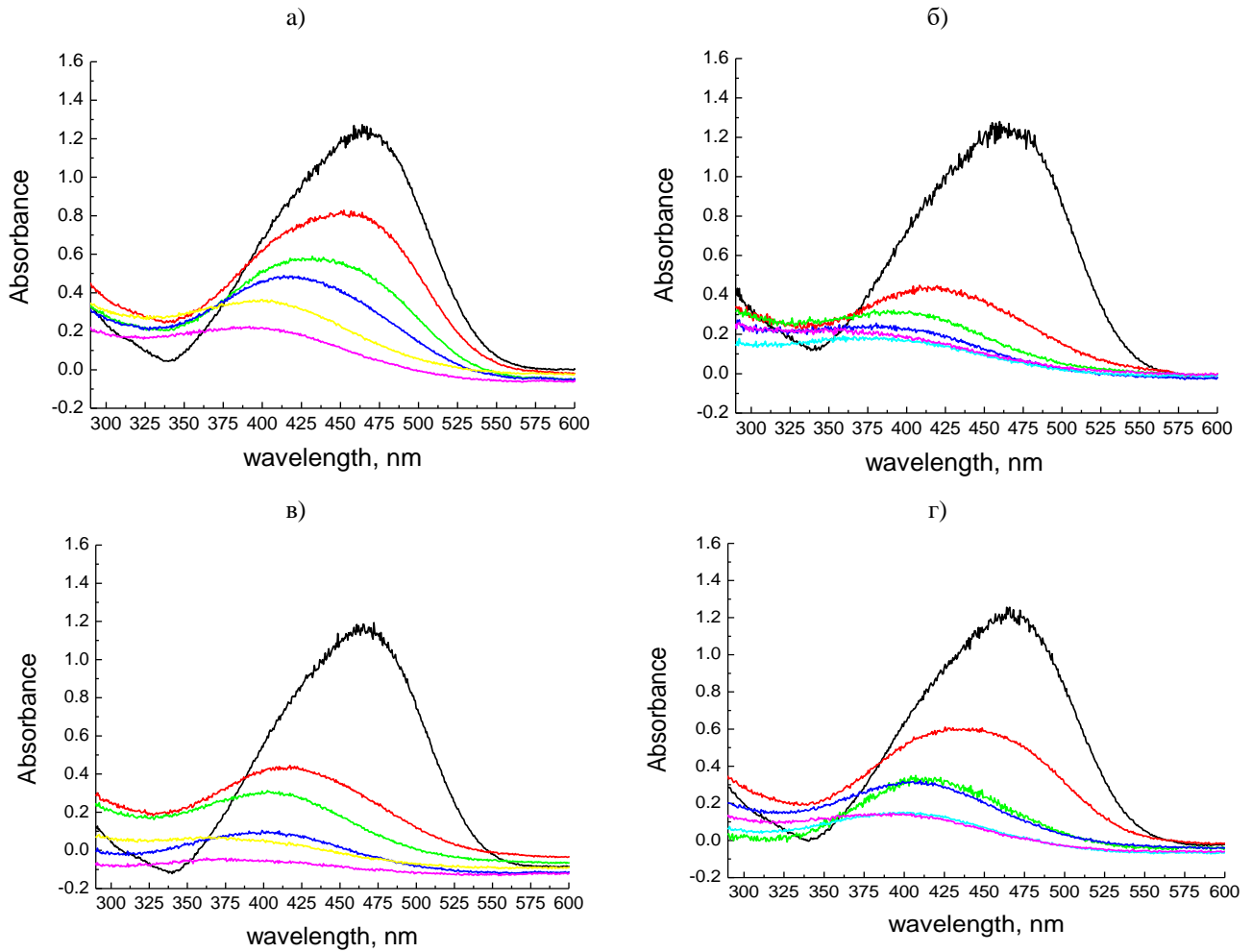


Рис. 3. Спектри поглинання водного розчину МО, зняті через кожні 20 хвилин опромінення лампою ДРТ-125 протягом двох годин з використанням плівок ZnO з різним рівнем легування ітрієм: (а) нелегована плівка, (б) 2,4, (в) 3,9 і (г) 4,7 ваг. %.

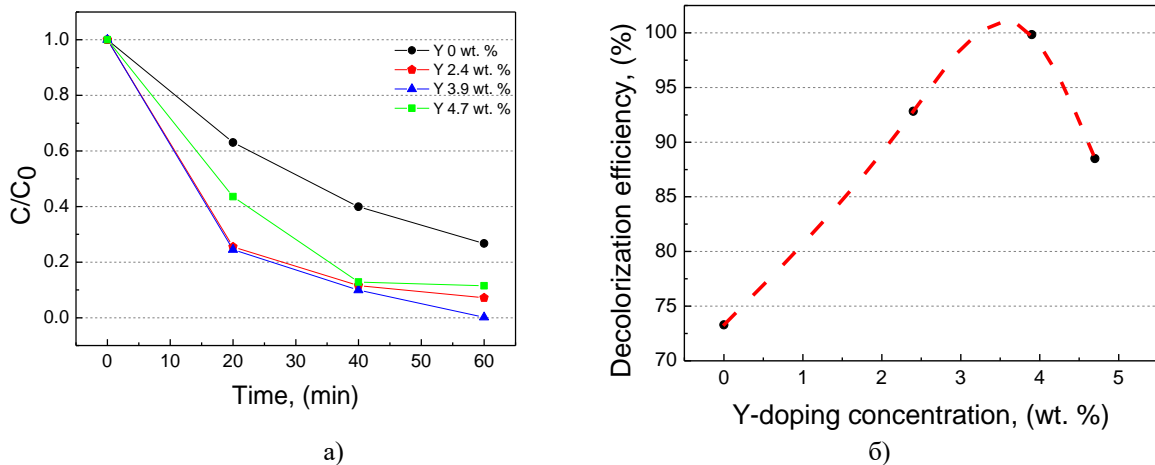


Рис. 4. Зміна концентрації в залежності від часу опромінення – а), ефективність деградації МО з використанням різних фотокаталізаторів – б). Для інтерполяції ефективності деградації використовували метод «Cubic spline».

у зменшенні розміру наночастинок, що призводить до покращення фотокаталітичної активності. Як було показано вище, в отриманих легуваних плівках ZnO спостерігалось зменшення середнього розміру зерен.

За допомогою графічного методу було виявлено, що фотодеградація барвника з допомогою плівок ZnO

та ZnO:Y відповідає кінетиці першого порядку [24]. На Рис. 5 зображено кінетику деградації МО під впливом УФ випромінювання за участі різних фотокаталізаторів. Значення констант швидкості реакції ( $k$ ) для плівок ZnO:Y з концентрацією Y: 0; 2,4; 3,9 та 4,7 ваг. % становлять  $2,5 \cdot 10^{-2} \text{ хв}^{-1}$ ,

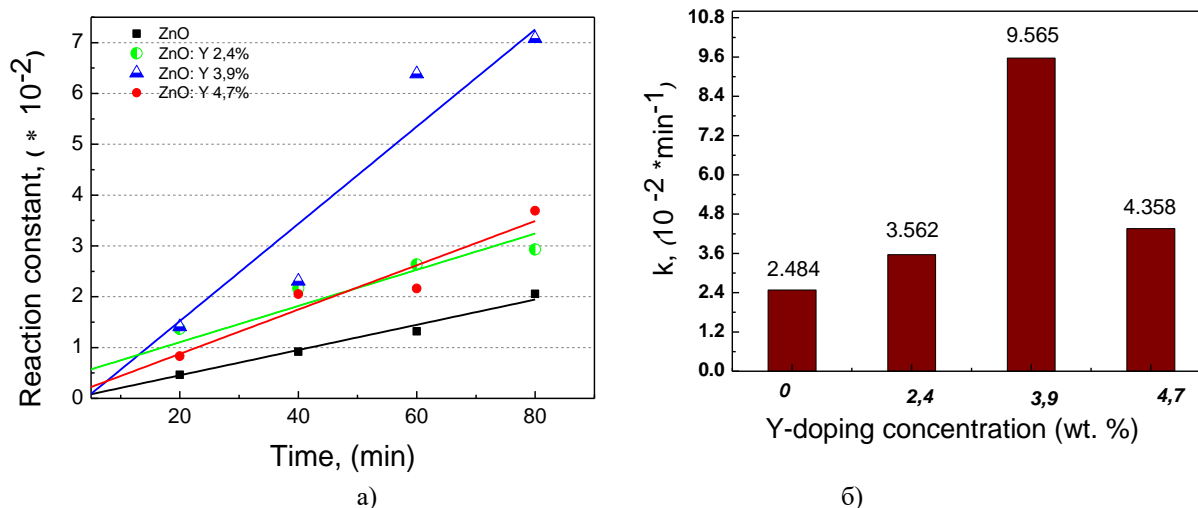


Рис. 5. Кінетика знебарвлення МО з використанням фотокаталізаторів ZnO та ZnO:Y – а), представлення констант реакції у вигляді стовпчастої діаграми – б).

$3,5 \cdot 10^{-2} \text{ хв}^{-1}$ ,  $9,6 \cdot 10^{-2} \text{ хв}^{-1}$  і  $4,3 \cdot 10^{-2} \text{ хв}^{-1}$ , відповідно. На Рис. 5б з метою візуалізації відмінностей значень констант швидкості реакції подано гістограму для зразків з різною концентрацією ітрію.

Виявлено позитивний вплив легування Y на фотокаталітичну активність отриманих плівок. Константа швидкості реакції для ZnO:Y з 3,9 ваг. % ітрію збільшилася більш ніж у три рази порівняно з нелегованим зразком. У роботі [14] ZnO:Y з концентрацією Y 4 ваг. % показав максимальну ефективність деградації серед усіх зразків. Збільшення ефективності фоторозкладання барвника у [14] пов'язують із синергією між зменшенням розміру частинок і зменшенням значення  $E_g$ . У наших зразках також спостерігалось зменшення середнього розміру зерен, але найкращий результат був у випадку найбільшого значення  $E_g$ . Такі відмінності в фотокаталітичному механізмі можуть бути пов'язані зі зовсім іншим методом синтезу (плівки ZnO:Y отримано ВЧ магнетронним розпиленням). Parangusan та інші [15] повідомили, що найкращими фотокаталітичними властивостями володіє ZnO:Y 12 мол. %, для якого значення блакитного зсуву є найбільшим. Автори прийшли до висновку, що легування Y призводить до блакитного зсуву смуг поглинання та збільшення поверхневих дефектів і кисневих вакансій. Результати досліджень дифракції X-променів для характеристики плівок цинк оксиду з різним рівнем легування ітрієм демонструвалися нами у роботі [18]. Для усіх наших експериментальних зразків у спектрах дифракції X-променів був присутній лише пік, що відповідає площині (002). Інших піків, які б могли асоціюватися з присутністю металічного ітрію чи його оксидів не було виявлено. У [25] для синтезованих плівок ZnO, отриманих методом ВЧ магнетронного розпилення з потужністю менше 200 Вт, пік (002) характеризувався наявністю значної кількості гідроксильних груп, приєднаних до решітки Zn. Під час фотокаталітичного процесу в ZnO гідроксильні групи на поверхні беруть активну участь в окисленні органічних сполук шляхом захоплення дірок ( $h^+$ ) з напівпровідника, що призводить до

утворення гідроксильних радикалів. Збільшення вмісту гідроксидних груп на поверхні підвищує фотокаталітичну активність [26]. Грунтуючись на отриманих результатах і літературі, механізм посилення фотодеградації може бути пов'язаний із зменшенням середнього розміру зерен, а також із синергічним ефектом між Y і дефектами поверхні в каталізаторі ZnO.

## Висновки

Плівки цинк оксиду з різним рівнем легування ітрієм отримали на скляних підкладках височастотним магнетронним розпиленням. Вплив легування ітрієм на фотокаталітичні властивості вивчали проведенням серії експериментів з різними концентраціями Y (0; 2,4; 3,9 та 4,7 ваг. %) при однакових параметрах фотокаталітичного експерименту. Аналіз поверхні, проведений за допомогою атомно-силового мікроскопа, продемонстрував зменшення розмірів нанокристалітів у плівках ZnO:Y зі збільшенням рівня легування. Більше того, спостерігався блакитний зсув краю власного поглинання плівок при збільшенні рівня легування від 0 до 3,9 ваг. % і червоний зсув для 4,7 ваг. %. Збільшення оптичної ширини забороненої зони відіграє значну роль у підвищенні фотокаталітичної активності.

Показано, що легування ітрієм плівок ZnO позитивно впливає на фотокаталітичну активність. Фотокаталітична ефективність легованих ітрієм фотокаталізаторів ZnO зростає зі збільшенням концентрації Y від 0 до 3,9 ваг. %, але подальше збільшення концентрації Y призводило до зниження ефективності фотокаталізатора. Ефективність розкладання барвника становила 73,3; 92,8; 99,8 та 88,5 % для плівок ZnO з концентрацією ітрію 0; 2,4; 3,9 та 4,7 ваг. %, відповідно, протягом 60 хвилин УФ-опромінення. Значення констант швидкості реакції для плівок ZnO:Y з концентраціями Y 0; 2,4; 3,9 та 4,7 ваг. % становили відповідно  $2,5 \cdot 10^{-2} \text{ хв}^{-1}$ ,  $3,5 \cdot 10^{-2} \text{ хв}^{-1}$ ,  $9,6 \cdot 10^{-2} \text{ хв}^{-1}$  і  $4,3 \cdot 10^{-2} \text{ хв}^{-1}$ . Механізм

посилення фотодеградації можна пояснити зменшенням середнього розміру зерен і синергічним ефектом між Y і дефектами поверхні в каталізаторі ZnO.

**Грицак Л.** – кандидат фізико-математичних наук, науковий співробітник кафедри фізики твердого тіла фізичного факультету Львівського національного університету імені Івана Франка.

**Турко Б.** – кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри фізики твердого тіла фізичного факультету Львівського національного університету імені Івана Франка.

**Васільєв В.** - аспірант, молодший науковий співробітник кафедри фізики твердого тіла

фізичного факультету Львівського національного університету імені Івана Франка.

**Еліашевський Ю.** - кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри фізики твердого тіла фізичного факультету Львівського національного університету імені Івана Франка.

**Коструба А.** – Доктор фізико-математичних наук, професор, завідувач кафедри фізики і математики Львівського національного університету ветеринарної медицини та біотехнологій імені С.З. Гжицького.

**Грицак А.** – аспірант кафедри фізики твердого тіла фізичного факультету Львівського національного університету імені Івана Франка.

- [1] A.A. Yaqoob, T. Parveen, K. Umar, I. Mohamad, N. Mohamad, *Role of Nanomaterials in the Treatment of Wastewater: A Review*, Water, 12(2), 495 (2020); <http://doi.org/10.3390/w12020495>.
- [2] O.E. Baibara, M.V. Radchenko, V.A. Karpyna, A.I. Ievtushenko, *A Review of the Some Aspects for the Development of ZnO Based Photocatalysts for a Variety of Applications*, Physics and Chemistry of Solid State, 22(3), 585 (2021); <http://doi.org/10.15330/pcss.22.3.585-594>.
- [3] S. Kumar, R. Kavitha, C. Sushma, *Doped zinc oxide nanomaterials: structure–electronic properties and photocatalytic applications*, Surface Science of Photocatalysis, 285 (2020); <http://doi.org/10.1016/b978-0-08-102890-2.00009-9>.
- [4] T. Pandiyarajana, R. Mangalarajaa, B. Karthikeyan, R. Udayabhaskar, D. Contreras, S. Sepulveda-Guzman, M. Gracia-Pinillagh, *Influence of RE (Pr<sup>3+</sup>, Er<sup>3+</sup>, Nd<sup>3+</sup>) doping on structural, vibrational and enhanced persistent photocatalytic properties of ZnO nanostructures*, Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy, 268, 120679 (2022);
- [5] S. Selvaraj, M. Mohan, M. Navaneethan, S. Ponnusamy, C. Muthamizhchelvan, *Synthesis and photocatalytic activity of Gd doped ZnO nanoparticles for enhanced degradation of methylene blue under visible light*, Materials Science in Semiconductor Processing, 103 (2019); <http://doi.org/10.1016/j.mssp.2019.104622>.
- [6] A.L.T. Zheng, C.A.C. Abdullah, E.L.T. Chung, Y. Andou, *Recent progress in visible light-doped ZnO photocatalyst for pollution control*, International Journal of Environmental Science and Technology, (2022); <http://doi.org/10.1007/s13762-022-04354-x>.
- [7] N. Gonçalves, M. Paganini, P. Armillotta, E. Cerrato, P. Calza, *The effect of cobalt doping on the efficiency of semiconductor oxides in the photocatalytic water remediation*, Journal of Environmental Chemical Engineering, 7(6), 103475 (2019); <http://doi.org/10.1016/j.jece.2019.103475>.
- [8] J. González-Crisostomo, R. López-Juárez, V. Petranovskii, *Photocatalytic Degradation of Rhodamine B Dye in Aqueous Suspension by ZnO and M-ZnO (M = La<sup>3+</sup>, Ce<sup>3+</sup>, Pr<sup>3+</sup> and Nd<sup>3+</sup>) Nanoparticles in the Presence of UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>*, Processes, 9(10), 1736 (2021); <http://doi.org/10.3390/pr9101736>.
- [9] N. Sang, N. Quan, N. Tho, N. Tuan, T. Tung, *Mechanism of enhanced photocatalytic activity of Cr-doped ZnO nanoparticles revealed by photoluminescence emission and electron spin resonance*, Semiconductor Science and Technology, 34(2), 025013 (2019); <http://doi.org/10.1088/1361-6641/aaf820>.
- [10] L. Wang, W. Ma, J. Ma, G. Shao, *Growth of Well-aligned Ag-doped ZnO Nanorods Arrays on FTO Substrate Using Electrochemical Approach: Optical Properties and Photocatalytic Activity*, International Journal of Electrochemical Science, 14, (2019); <http://doi.org/10.20964/2019.09.81>.
- [11] Q. Bei, H. Yulong, L. Hongfang, D. Zehua, *Photocatalytic Degradation and Toxic Effects of Ag-Doped ZnO Nanocrystallites*, Journal of Nanoscience and Nanotechnology, 11(11), 9513 (2011); <http://doi.org/10.1166/jnn.2011.5281>.
- [12] I. Massoudi, T. Ghrib, A.L. Al-otaibi, K. Al-hamad, S. Al-malky, M. Al-otabi, M. Al-yatimy, *Effect of Yttrium Substitution on Microstructural, Optical, and Photocatalytic Properties of ZnO Nanostructures*, Journal of Electronic Materials, 49, 5353 (2020); <http://doi.org/10.1007/s11664-020-08274-9>.
- [13] U. Alama, A. Khana, W. Razaa, A. Khanb, D. Bahnemannc, M. Muneer, *Highly efficient Y and V co-doped ZnO photocatalyst with enhanced visible light sensitized photocatalytic activity*, Catalysis Today, 284, 169 (2017); <http://doi.org/10.1016/j.cattod.2016.11.037>.
- [14] T. Rungsawanga, S. Sujinnapramb, S. Nilphaic, S. Wongrekdeeb, *Influence of yttrium doping on ZnO nanoparticles for enhanced photocatalytic degradation of methylene blue*, Digest Journal of Nanomaterials and Biostructures, 16(4), 1209 (2021);
- [15] H. Parangusan, D. Ponnamma, M. Al-Maadeed, A. Marimuthu, *Nanoflower-like Yttrium-doped ZnO Photocatalyst for the Degradation of Methylene Blue Dye*, Photochemistry and Photobiology, 94(2), 237 (2018); <http://doi.org/10.1111/php.12867>.

- [16] P. Sanoop, S. Anas, S. Ananthakumar, V. Gunasekar, R. Saravanan, V. Ponnusami, *Synthesis of yttrium doped nanocrystalline ZnO and its photocatalytic activity in methylene blue degradation*, Arabian Journal of Chemistry, 9, S1618 (2016); <http://doi.org/10.1016/j.arabjc.2012.04.023>.
- [17] S.K. Sharma, R. Gupta, G. Sharma, K. Vemula, A.R. Koirala, N.K. Kaushik, E.H. Choi, D.Y. Kim, L.P. Purohit, B.P. Singh, *Photocatalytic performance of yttrium-doped CNT-ZnO nanoflowers synthesized from hydrothermal method*, Materials Today Chemistry, 20, 100452 (2021); <http://doi.org/10.1016/j.mtchem.2021.100452>.
- [18] B. Turko U. Mostovoy, M. Kovalenko, Y. Eliyashevskiy, Y. Kulyk, O. Bovgyra, V. Dzikovskiy, A. Kostruba, R. Vlokh, V. Savaryn, V. Stybel, B. Tsizh, V. Majevska, *Effect of dopant concentration and crystalline structure on absorption edge of ZnO:Y films*, Ukrainian Journal of Physical Optics, 22(1), 31 (2021); <https://doi.org/10.3116/16091833/22/1/31/2021>.
- [19] L.I. Maissel, R. Glang, Handbook of Thin Film Technology (McGraw-Hill, New York, 1970).
- [20] S. Anandan, S. Muthukumaran, *Influence of yttrium on optical, structural and photoluminescence properties of ZnO nanopowders by sol-gel method*, Optical Materials, 35(12), 2241 (2013); <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2013.06.009>.
- [21] A. Bouaine, H. Guendouz, G. Schmerber, Y. Zehouma, *Synthesis and characterization of Y-doped ZnO thin films prepared by spin-coating technique*, Australian Journal of Basic and Applied Sciences, 13, 49 (2019); <https://doi.org/10.22587/ajbas.2019.13.7.8>.
- [22] A. Youvanidha, B. Vidhya, P. Issac Nelson, R. Rathes Kannan, S.K. Suresh Babu, International Conference on Inventive Material Science Applications (ICIMA, 2019). P. 2166; <https://doi.org/10.1063/1.5131610>.
- [23] O. Bazta, A. Urbietta, J. Piqueras, P. Fernández, M. Addou, J.J. Calvino, A.B. Hungria, *Influence of yttrium doping on the structural, morphological and optical properties of nanostructured ZnO thin films grown by spray pyrolysis*, Ceramics International, 45(6), 6842 (2019); <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2018.12.178>.
- [24] L. Toporovska, B. Turko, M. Savchak, M. Seyedi, I. Luzinov, A. Kostruba, V. Kapustianyk, A. Vaskiv, *Zinc oxide: reduced graphene oxide nanocomposite film for heterogeneous photocatalysis*, Optical and Quantum Electronics, 52(1), 1 (2020); <https://doi.org/10.1007/s11082-019-2132-1>.
- [25] D. Das, P. Mondal, *Photoluminescence phenomena prevailing in c-axis oriented intrinsic ZnO thin films prepared by RF magnetron sputtering*, RSC Advances, 4(67), 35735 (2014); <https://doi.org/10.1039/c4ra06063f>.
- [26] L. Toporovska, A. Hryzak, B. Turko, V. Rudyk, V. Tsybulskiy, R. Serkiz, *Photocatalytic properties of zinc oxide nanorods grown by different methods*, Optical and Quantum Electronics, 49(12), 1 (2017); <https://doi.org/10.1007/s11082-017-1254-6>.

L. Hrytsak<sup>1</sup>, B. Turko<sup>1</sup>, V. Vasil'ev<sup>1</sup>, Y. Eliyashevskiy<sup>1</sup>, A. Kostruba<sup>2</sup>, A. Hrytsak<sup>1</sup>

## Effect of Yttrium Doping on the Photocatalytic Properties of ZnO Thin Films

<sup>1</sup>Ivan Franko National University of Lviv, Lviv, Ukraine;

<sup>2</sup>Stepan Gzhytskyi National University of Veterinary Medicine and Biotechnologies Lviv, Lviv, Ukraine

Zinc oxide films with different levels of yttrium doping are deposited on glass substrates, using radio-frequency magnetron sputtering. Photocatalytic properties were investigated for such Y-doping weight concentration: 0, 2.4, 3.9, 4.7 %. The studies showed that the Y-doping significantly improves the photocatalytic activity of the ZnO thin films. It was shown that the ZnO:Y 3.9 wt. % presents the highest degradation efficiency of 100 % during 80 minutes and the largest rate constant  $9.6 \cdot 10^{-2} \text{ min}^{-1}$  among all samples.

**Key words:** zinc oxide, photocatalysis, photodegradation, absorption spectra.