МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ Робота на Всеукраїнський конкурс студентських наукових робіт з

галузевих знань спеціальностей у 2017/2018 році

на тему:

«ХАРАКТЕРИЗАЦІЯ І ВЛАСТИВОСТІ НАНОКОМПОЗИТУ ТіO₂-SnO₂, ОТРИМАНОГО ГІДРОЛІТИЧНИМ МЕТОДОМ» шифр:«НАНОКОМПОЗИТ»

АНОТАЦІЯ

Шифр наукової роботи - «Нанокомпозит».

Титану (IV) оксид – це матеріал, який активно вивчається і застосовується у фотокаталізі, виробництві сонячних елементів мокрого типу та газових сенсорів тощо. Стануму (IV) оксид є активним каталізатором та перспективним матеріалом для виготовлення газових сенсорів. Титану (IV) оксид та стануму (IV) оксид, які є напівпровідниками з великою шириною забороненої зони, можуть утворювати тверді розчини один з одним, що матимуть покращені властивості, наприклад, вищу фотокаталітичну активність порівняно з індивідуальними оксидами. Отже, синтез нанокомпозитів титану (IV) оксиду та стануму (IV) оксиду простим і доступним методом із заданими фізикохімічними властивостями є актуальним завданням, а виявлення факторів, що впливають на їхню фотокаталітичну активність – необхідна умова для створення високоефективних фотокаталітичних систем.

Метою даної роботи є одержання нанокомпозитів титану (IV) оксиду та стануму (IV) оксиду простим гідролітичним методом, їхня характеризація та визначення фізико-хімічних властивостей. Завданням даного дослідження було: напрацювання зразків нанокомпозитів титану (IV) оксиду та стануму (IV) оксиду обраним методом різного складу та дослідження їхньої морфології та фізико-хімічних властивостей; вивчення впливу кількості вихідних реагентів на сорбційні та фотокаталітичні властивості нанокомпозитів TiO₂-SnO₂. Новизна та практичність даної роботи полягає у використанні вдосконаленого способу синтезу наноструктурних титану (IV) оксиду та стануму (IV) оксиду, який відрізняється використанням невеликої кількості доступних реагентів та зниженою енергоємністю процесу.

Для дослідження фізико-хімічних властивостей нанокомпозитів використовували метод рентгенофазового аналізу, скануючу електронну мікроскопію, інфрачервону спектроскопію та спектральний аналіз.

2

Наукова робота складається з 4 розділів загальним обсягом 23 сторінки, містить 6 рисунків, 2 таблиці і 20 посилань на використані наукові джерела.

На основі наукової роботи опубліковано 1 статтю та 4 тези.

НАНОКОМПОЗИТ ТіO₂-SnO₂, ГІДРОЛІТИЧНИЙ МЕТОД, СОРБЦІЙНІ ВЛАСТИВОСТІ, ФОТОКАТАЛІТИЧНА АКТИВНІСТЬ

3MICT

Стор.
ВСТУП
1 ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД 6
1.1 Методи синтезу фотокаталізаторів 6
1.2 Принципи збільшення каталітичної ефективності
фотокаталізаторів7
2 СИНТЕЗ НАНОКОМПОЗИТІВ ТіО ₂ -SnO ₂ ГІДРОЛІТИЧНИМ МЕТОДОМ10
3 ХАРАКТЕРИЗАЦІЯ НАНОКОМПОЗИТІВ ТіO ₂ -SnO ₂ , ОТРИМАНИХ
ГІДРОЛІТИЧНИМ МЕТОДОМ11
3.1 Рентгенофазовий аналіз11
3.2 Скануюча електронна мікроскопія13
3.3 Інфрачервона спектроскопія14
4 ВЛАСТИВОСТІ ОТРИМАНИХ ЗРАЗКІВ НАНОКОМПОЗИТІВ TiO ₂ -SnO ₂ 16
4.1 Сорбційні властивості отриманих зразків нанокомпозитів титану
(IV) оксиду та стануму (IV) оксиду16
4.2 Фотокаталітична активність одержаних зразків нанокомпозитів
титану (IV) оксиду та стануму (IV) оксиду17
ВИСНОВКИ
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ

ВСТУП

Значна увага при дослідженні каталітичних процесів приділяється використанню наноструктурних напівпровідників в якості фотокаталізаторів для видалення органічних та неорганічних забрудників з водних або газофазних систем в процесах екологічного каталізу, підготовки питної води тощо.

Фотокаталітичне окислення з використанням титану (IV) оксиду в якості фотокаталізатора останнім часом привертає до себе значну увагу завдяки економічній ефективності та можливості проведення процесу за умов навколишнього середовища, а також високій каталітичній стабільності TiO₂. Проте, практичне застосування титану (IV) оксиду обмежене через його низьку ефективність, обумовлену надто швидкою рекомбінацією фотозбуджених електронів і дірок, що призводить до низького квантового виходу.

Одним з ефективних методів попередження рекомбінації фотогенерованих носіїв зарядів і, як наслідок, посилення фотокаталітичної активності титану (IV) оксиду є створення нанокомпозитів на його основі, наприклад, у поєднанні зі стануму (IV) оксидом.

В сучасній літературі описано чимало методів отримання нанокомпозитів титану (IV) та стануму (IV) оксидів, серед яких: гідротермальний синтез, зольгель метод, метод хімічного осадження, електроспінінг, гідролітичний синтез, механічний синтез, полуменевий синтез тощо. Незважаючи на різноманіття методів отримання наноструктур, існує нагальна потреба у використанні саме такого методу синтезу, який не тільки гарантує одержання нанокомпозитів із заданими фізико-хімічними властивостями, але й є недорогим і простим у здійсненні.

В даній роботі було запропоновано простий спосіб синтезу нанокомпозитів титану (IV) оксиду та стануму (IV) оксиду; охарактеризовано структуру отриманих нанокомпозитів TiO₂-SnO₂ та досліджено їхні властивості, як перспективних матеріалів для фотокаталізу.

5

1 ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД

1.1 Методи синтезу фотокаталізаторів

Для одержання фотокаталізаторів на основі титану (IV) оксиду використовуються різноманітні методи: гідротермальний, полуменевий, механічний, гідролітичний, золь-гель метод, електроспінінг, синтез в багатоатомних спиртах тощо, кожний з яких має певні особливості.

Гідротермальний синтез – це простий, ефективний, швидкий та екологічний метод хімічного синтезу оксидів металів, комплексних оксидів, твердих розчинів та композитних наночастинок, що зазвичай проводиться в сталевих посудинах високого тиску – автоклавах, з тефлоновими прокладками або без них з контрольованою температурою або тиском і з реакцією у водних розчинах [1-3].

Золь-гель метод є універсальним процесом, який використовується для отримання різних стабільних оксидів металів підвищеної чистоти за умов оточуючого середовища. У типовому золь-гель процесі колоїдна суспензія, тобто, золь утворюється внаслідок реакцій гідролізу та полімеризації попередників, які, як правило, є неорганічними солями металів або металевими органічними сполуками, такими як алкоксиди металів. Повна полімеризація та видалення розчинника призводять до переходу від рідкого золя до твердої гелевої фази. Тонкі плівки можуть бути отримані на ділянці підкладинки нанесенням покриття центрифугуванням (spin-coating) або нанесенням покриття занурюванням (dip-coating). Вологий гель утворюється, коли золь виливають у форму, і тоді вологий гель перетворюється в щільний оксид після подальшого сушіння та термічної обробки [1,4].

Електроспінінг є порівняно дешевою та легко застосованою технологією, що дозволяє синтезувати матеріали у вигляді волокон певної міцності і гнучкості у великих масштабах, і яка полягає у випорскуванні попередників через голки з нержавіючої сталі при прикладанні високої напруги для отримання волокнистих нетканих килимків на колекторі. Ця технологія дає можливість отримувати одновимірні (1D) нанорозмірні гетероструктури (нановолокна) оксидів металів необхідного складу із заданою морфологією [5,6].

Полуменевий синтез – це унікальний і не дорогий процес отримання наноструктурних частинок, який відбувається у полуменевому реакторі, що складається з дозатора реагентів, системи доставки реагентів і пристрою накопичення отриманих частинок продукту. Також використовується пальник, який може складатись з декількох концентричних трубок для сумісного і одночасного подавання різних газів. Частинки продукту зазвичай накопичують на колекторі [7].

Проте, найперспективнішими є такі прості і універсальні методи синтезу, які дозволяють одержувати нанорозмірні фотокаталізатори із заданим фізикохімічними властивостями, наприклад, гідролітичний синтез. Цей метод є дешевим, швидким і проводиться за умов оточуючого середовища із використанням доступних та нетоксичних вихідних реагентів [8-10].

У роботі 2016 року «Синтез, характеризація і властивості титану (IV) оксиду, отриманого гідролітичним методом» було зроблено висновок, що через недостатню фотокаталітичну активність титану (IV) оксиду по відношенню до органічних барвників необхідно розробляти методи посилення його ефективності.

1.2 Принципи збільшення каталітичної ефективності фотокаталізаторів

Виробництво наноструктурних матеріалів останнім часом привертає значну увагу завдяки унікальним властивостям, що притаманні таким матеріалам розміром до 100 нм [11]. Серед усіх наноматеріалів наноструктурний титану (IV) оксид TiO₂ є найвідомішим фотокаталізатором, який широко використовується завдяки високій фотокаталітичній активності, нетоксичності, низькій вартості, екологічності, довготривалій хімічній інертності та каталітичній стабільності. Незважаючи на його численні переваги, широке комерційне застосування TiO₂ обмежене його низькою ефективністю, а саме низьким квантовим виходом фотокаталітичного процесу [5,7,12,13].

Як ефективність фотокаталітичного відомо, квантова процесу участю визначається конкуренцією двох процесів носіїв за заряду (фотогенерованих електронів і дірок): реакцій окислення-відновлення та процесів рекомбінації. Чимало досліджень зосереджено на методах зменшення рекомбінації, наприклад, створенні композитів «напівпровідник-метал» або «напівпровідник-напівпровідник». Модифікування титану (IV)оксиду благородними металами (Au, Ag, Pt) ефективно збільшує фотокаталітичну ефективність TiO_2 , але є дуже дорогим процесом [7].

Фотокаталітична ефективність також може бути збільшена шляхом поєднання двох напівпровідників, які мають відповідні потенціали зони провідності та валентної зони. В останні роки було проведено ряд досліджень, пов'язаних зі створенням гетероструктур на основі TiO₂ у поєднанні з іншими напівпровідниками, такими як SnO₂, WO₃, Fe₂O₃, ZnO, CdS, Cd₃P₂, серед яких найбільшу увагу привертає створення композитів на основі TiO₂ та SnO₂[7].

Ширина забороненої зони SnO₂ та TiO₂ становить 3,88 eB та 3,2 eB відповідно, а потенціал зони провідності стануму (IV) оксиду приблизно на 0,5 В більш позитивний, ніж у титану (IV) оксиду. Коли дві напівпровідникові частинки поєднані, зона провідності SnO₂ діє як «пастка» для фотогенерованих електронів. Оскільки фотогенеровані дірки рухаються в протилежному напрямку, вони накопичуються у валентній зоні частинки TiO₂, завдяки чому зростає ефективність розподілу носіїв заряду, збільшується тривалість їхнього існування, і зменшується ймовірність рекомбінації. Як наслідок, збільшення забороненої зони нанокомпозиту TiO₂-SnO₂ зменшує ймовірність рекомбінації

носіїв заряду, завдяки чому покращується фотоактивність такого наноструктурного композиту [5-7,14].

Нанокомпозити на основі титану (IV) оксиду та стануму (IV) оксиду мають чималу кількість застосувань у гетерогенному фотокаталізі для очищення води та повітря, в оптоелектроніці, наноелектроніці та у виробництві хімічних сенсорів завдяки високій чутливості та селективності щодо багатьох видів газів, покращеному та швидкому часу відгуку і відновлення нанокомпозитів [8,15-18].

Ще однією перевагою поєднання титану (IV) оксиду зі стануму (IV) оксидом є те, що SnO_2 дозволяє стабілізувати анатазну фазу TiO_2 , яка, як правило, вважається більш фотоактивною, ніж фаза рутилу, і тому саме анатазу надається перевага у фотокаталітичних застосуваннях. Зазвичай анатазна фаза перетворюється на рутил, найбільш стійку фазу, при високій температурі (близько 600 °C), але для наноматеріалів вона може бути іншою. Було досліджено, що стабільність анатазної фази може залежати від розміру частинок у випадку наноматеріалів та різних домішок, наприклад SnO_2 [12,19,20].

2 СИНТЕЗ НАНОКОМПОЗИТІВ ТіО₂-SnO₂ ГІДРОЛІТИЧНИМ МЕТОДОМ

В якості вихідних реагентів для синтезу нанокомпозитів титану (IV) оксиду та стануму (IV) оксиду використовували розчини титану (IV) хлориду, стануму (IV) хлориду та абсолютизований ізопропіловий спирт. Попередники титану (IV) оксиду та стануму (IV) оксиду отримували перегонкою розчинів титану (IV) хлориду та стануму (IV) хлориду, відповідно, в абсолютизований ізопропіловий спирт.

Гідролітичний синтез нанокомпозитів титану (IV) оксиду та стануму (IV) оксиду проводили гідролізом попередників титану (IV) оксиду та стануму (IV) оксиду у воді. Суміш при інтенсивному перемішуванні нагрівали до температури 90 °C і витримували протягом 40 хвилин для осадження нанокомпозитів титану (IV) оксиду та стануму (IV) оксиду. Потім одержаний осад висушували при температурі 80 °C впродовж 6 годин та прожарювали при температурі 500 °C впродовж 2 годин, після чого розмелювали у порцеляновій ступці.

Умови синтезу зразків нанокомпозитів TiO₂-SnO₂ наведено в таблиці 2.1.

Зразок	Вміст попередника	Вміст попередника	Вміст води, г
	ТіΟ ₂ , г	SnO ₂ , г	
1	62	0	23,8
2	50	4	22,5
3	37	8	21,2
4	25	12	19,9
5	12	16	18,6

Таблиця 2.1 – Умови синтезу зразків нанокомпозитів TiO₂-SnO₂.

3 ХАРАКТЕРИЗАЦІЯ НАНОКОМПОЗИТІВ ТіO₂-SnO₂, ОТРИМАНИХ ГІДРОЛІТИЧНИМ МЕТОДОМ

3.1 Рентгенофазовий аналіз

Аналіз фазового складу отриманих зразків нанокомпозитів титану (IV) оксиду та стануму (IV) оксиду здійснювали рентгенофазовим аналізом (РФА) на рентгенівському дифрактометрі IV Rigaku Ultima з CuKa випромінюванням. Дифрактограми зразків 1-5 нанокомпозитів TiO₂-SnO₂ представлено на рисунку 3.1.



Рисунок 3.1 – Дифрактограми зразків 1-5 нанокомпозитів TiO₂-SnO₂: A – анатаз; R – рутил; C – каситерит.

Фазовий склад та розмір кристалітів отриманих зразків нанокомпозитів титану (IV) оксиду та стануму (IV) оксиду наведено в таблиці 3.1

Зразок	Фаза	Вміст фази, %	Розмір кристалітів, нм
1	Рутил	100	10,9
2	анатаз	60	7,7
	рутил	30	9,9
	каситерит	10	2,5
3	анатаз	63	4,8
	рутил	12	5,0
	каситерит	25	5,8
4	анатаз	65	2,9
	каситерит	35	17,1
5	анатаз	21	3,9
	рутил	4	4,4
	каситерит	75	23,0

Таблиця 3.1 – Фазовий склад та розмір кристалітів зразків

Як видно з даних, представлених на рисунку 3.1 та в таблиці 3.1, фаза анатазу стабілізується за наявності стануму (IV) оксиду у складі нанокомпозиту, оскільки Зразок 1, що представлений чистим титану (IV) оксидом, складається виключно з фази рутилу, а зразки нанокомпозитів містять переважно анатазну фазу, причому зі збільшенням вмісту стануму (IV) оксиду у зразку збільшується вміст фази анатазу, та зростає розмір кристалітів каситериту.

3.2 Скануюча електронна мікроскопія

Структуру і морфологію отриманих зразків нанокомпозитів TiO_2-SnO_2 вивчали методом СЕМ за допомогою скануючого електронного мікроскопа РЭМ-106И. Електронні фотографії синтезованих зразків нанокомпозитів титану (IV) оксиду та стануму (IV) оксиду наведено на рисунку 3.2.



Рисунок 3.2 – Електронні фотографії зразків нанокомпозитів TiO₂-SnO₂: 1 – Зразок 1; 2 – Зразок 2; 3 – Зразок 3; 4 – Зразок 4; 5 – Зразок 5.

З рисунку 3.2 видно, що електронна фотографія Зразка 1 (чистого TiO_2) сильно відрізняється від інших фотографій зразків нанокомпозитів TiO_2 -SnO₂. Наночастинки чистого титану (IV) оксиду мають сферичну форму, та є більшменш однорідними, а наночастинки нанокомпозитів титану (IV) оксиду та стануму (IV) оксиду формують велику кількість агрегатів та агломератів різної форми. Морфологія нанокомпозитів дуже схожа, і зі збільшенням вмісту стануму (IV) оксиду зростає розмір агломератів у наступному порядку: Зразок 5, Зразок 1, Зразок 2, Зразок 3 та Зразок 4.

3.3 Інфрачервона спектроскопія

Ідентифікацію хімічних зв'язків та дослідження хімії поверхні отриманих зразків нанокомпозитів TiO_2 -SnO₂ проводили методом інфрачервоної спектроскопії за допомогою інфрачервоного спектрометра Thermo Nicolet Nexus FTIR в області 4000 – 400 см⁻¹. Інфрачервоні спектри синтезованих зразків нанокомпозитів TiO₂-SnO₂ наведено на рисунку 3.3.



Рисунок 3.3 – Інфрачервоні спектри зразків 1-5 нанокомпозитів TiO₂-SnO₂.

З рисунку 3.3 можна побачити, що у спектрі чистого TiO₂ (Зразок 1) спостерігається широка інтенсивна полоса поглинання в інтервалі 3700-2600 см⁻¹ з максимумом при 3420 см⁻¹, яка відповідає області поглинання v(OH). В області поглинання $\delta(H_2O)$ спостерігається полоса з максимумом при 1630 см⁻¹. Полоса поглинання з максимумом при 1410 см⁻¹ належить до місткових коливань $\delta(Ti-O(H)-Ti)$. Коливання v(TiO) октаедру TiO₆ проявляються в інфрачервоному спектрі у вигляді широкої дифузної полоси поглинання в області 900-500 см⁻¹ з максимумом при 670 см⁻¹ [13,16].

Інфрачервоні спектри нанокомпозитів TiO₂-SnO₂ (Зразки 2-5) характеризуються аналогічними полосами поглинання, але з'являється додаткова полоса поглинання з максимумом при 590 см⁻¹, що належить до антисиметричних коливань Sn-O-Sn [16].

Отже, усі інфрачервоні спектри синтезованих зразків нанокомпозитів TiO₂-SnO₂ майже ідентичні, відповідають стандартним інфрачервоним спектрам титану (IV) оксиду та стануму (IV) оксиду та показують, що одержані зразки мають велику кількість фізично адсорбованої води.

4 ВЛАСТИВОСТІ ОТРИМАНИХ ЗРАЗКІВ НАНОКОМПОЗИТІВ TiO₂-SnO₂

4.1 Сорбційні властивості отриманих зразків нанокомпозитів титану (IV) оксиду та стануму (IV) оксиду

Для дослідження сорбційних властивостей синтезованих зразків нанокомпозитів титану (IV) оксиду та стануму (IV) оксиду використовували лабораторну установку, зображену на рисунку 4.1.



Рисунок 4.1 – Лабораторна установка для дослідження сорбційнофотокаталітичних властивостей:

а – принципова схема лабораторної установки; б – фотографія лабораторної
установки; 1 – УФ-лампа (Wonder HR 60); 2 – фільтр; 3 – реактор; 4 – насос; 5 – магнітний перемішувач; 6 – магнітна мішалка; 7 – крани; 8 – стенд.

Сорбційні властивості зразків нанокомпозитів титану (IV) оксиду та стануму (IV) оксиду досліджували на модельних розчинах метиленового блакитного. Зміну концентрації метиленового блакитного в залежності від тривалості процесу сорбції для кожного зразка нанокомпозитів титану (IV) оксиду та стануму (IV) оксиду наведено на рисунку 4.2.



Рисунок 4.2 – Зміна концентрації метиленового блакитного внаслідок процесу сорбції на нанокомпозиті TiO₂-SnO₂: 1 – Зразок 1; 2 – Зразок 2; 3 – Зразок 3; 4 – Зразок 4; 5 – Зразок 5.

Виходячи з даних, наведених на рисунку 4.2, видно, що кінетика адсорбції є дуже швидкою, і адсорбційна рівновага досягається вже через 10 хв. Найкращі сорбційні властивості серед синтезованих зразків має Зразок 1 (100 % TiO₂) та Зразок 5 (25 % TiO₂; 75 % SnO₂).

4.2 Фотокаталітична активність одержаних зразків нанокомпозитів титану (IV) оксиду та стануму (IV) оксиду

Дослідження фотокаталітичних властивостей зразків нанокомпозитів титану (IV) оксиду та стануму (IV) оксиду було проведено також на модельних розчинах метиленового блакитного за допомогою лабораторної установки,

представленої на рисунку 4.1. Дослідження проводили аналогічно сорбційним за одним тільки виключенням – додатково використовували УФвипромінювання (254 нм, потужність 9 Вт). Зміну концентрації метиленового блакитного в залежності від тривалості процесу фотокаталізу для кожного зразка нанокомпозитів титану (IV) оксиду та стануму (IV) оксиду наведено на рисунку 4.3.



Рисунок 4.3 – Зміна концентрації метиленового блакитного внаслідок фотокаталізу на нанокомпозиті TiO₂-SnO₂: 1 – Зразок 1; 2 – Зразок 2; 3 – Зразок 3; 4 – Зразок 4; 5 – Зразок 5.

Дані, представлені на рисунку 4.3, свідчать про різке зменшення концентрації модельного розчину барвника впродовж 10 хв. за рахунок адсорбції. Також можна побачити, що протягом перших 10 хв. фотокаталітичного процесу вищий ступінь деградації метиленового блакитного спостерігається під дією Зразка 1 та Зразка 5. Проте, найвищу фотокаталітичну активність серед усіх синтезованих зразків мають Зразок 1 та Зразок 2, що представлено 40 %-вим знебарвленням розчину органічного барвника протягом

30 хв. Однак, можна досягти і вищого ступеня деградації метиленового блакитного, якщо збільшити час контакту.

Отже, отримані результати добре узгоджуються зі структурними та морфологічними дослідженнями. Зразки нанокомпозитів TiO_2 -SnO₂, що мають менший розмір агломератів, демонструють кращі сорбційні властивості, а зразки нанокомпозитів TiO_2 -SnO₂, що мають менший розмір кристалітів, і, як наслідок, більшу питому площу поверхні, демонструють вищу фотокаталітичну активність. Наявність стануму (IV) оксиду посилює фотокаталітичну активність титану (IV) оксиду, але при цьому максимальний вміст стануму (IV) оксиду не повинен перевищувати 10 %.

ВИСНОВКИ

- 1. Синтезовано зразки нанопорошків титану (IV) оксиду та стануму (IV) оксиду простим гідролітичним методом, що дозволяє отримувати нанокомпозити з відомим і контрольованим хімічним і фазовим складом.
- Визначено, що наявність стануму (IV) оксиду у складі нанокомпозиту TiO₂-SnO₂ стабілізує анатазну фазу титану (IV) оксиду, в іншому випадку утворюється виключно рутильна фаза TiO₂.
- Знайдено, що зі збільшенням вмісту SnO₂ в нанокомпозиті збільшується розмір кристалітів каситериту, а розміри кристалітів анатазної і рутильної фаз TiO₂ зменшуються; розмір агломератів нанокомпозиту проходить через максимум.
- Встановлено, що нанопорошки TiO₂-SnO₂ з меншим розміром агрегатів і агломератів мають кращі сорбційні властивості, а нанопорошки TiO₂-SnO₂ з меншим розміром кристалітів демонструють вищу фотокаталітичну активність.
- 5. Вивчено, що необхідно синтезувати і досліджувати нанокомпозити із вмістом титану (IV) оксиду або стануму (IV) оксиду, що не перевищує 10%, які матимуть більшу питому площу поверхні, менший розмір кристалітів і, як наслідок, кращі сорбційні та фотокаталітичні властивості.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ

- M. M. Byranvand, A. N. Kharat, L. Fatholahi, and Z. M. Beiranvand, "A Review on Synthesis of Nano-TiO₂ via Different Methods," *J. Nanostructures*, vol. 3, pp. 1–9, 2013.
- [2] M. Hirano and T. Kono, "SYNTHESIS OF COMPOSITE NANOPARTICLES IN THE TiO₂-SnO₂ SYSTEM UNDER HYDROTHERMAL CONDITIONS," in 18 TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPOSITE MATERIALS, pp. 2–5.
- [3] L. R. Hou, L. Lian, L. Zhou, L. H. Zhang, and C. Z. Yuan, "Interfacial hydrothermal synthesis of SnO₂ nanorods towards photocatalytic degradation of methyl orange," *Mater. Res. Bull.*, vol. 60, pp. 1–4, 2014.
- [4] B. K. Mutuma, G. N. Shao, W. Duck, and H. Taik, "Sol gel synthesis of mesoporous anatase brookite and anatase brookite rutile TiO₂ nanoparticles and their photocatalytic properties," *J. Colloid Interface Sci.*, vol. 442, pp. 1–7, 2015.
- [5] L. Zhang, W. Yu, C. Han, J. Guo, Q. Zhang, and H. Xie, "Large Scaled Synthesis of Heterostructured Electrospun TiO₂/SnO₂ Nanofibers with an Enhanced Photocatalytic Activity," *J. Electrochem. Soc.*, vol. 164, no. 9, pp. 651–656, 2017.
- [6] J. Gong *et al.*, "Characteristics of SnO₂ nanofiber/TiO₂ nanoparticle composite for dye-sensitized solar cells," *AIP Adv.*, vol. 5, 2015.
- K. K. Akurati, A. Vital, R. Hany, B. Bommer, T. Graule, and M. Winterer, "One-step flame synthesis of SnO₂/TiO₂ composite nanoparticles for photocatalytic applications," *Int. J. Photoenergy*, vol. 7, pp. 153–161, 2005.
- [8] A. Marzec and P. Zbigniew, "Preparation of nanocrystalline composite TiO₂-SnO₂ powders using sol-gel method combined with hydrothermal treatment," *Process. Appl. Ceram.*, vol. 10, no. 4, pp. 249–256, 2016.
- [9] H. Yuan and J. Xu, "Preparation, Characterization and Photocatalytic Activity of Nanometer SnO₂," *Int. J. Chem. Eng. Appl.*, vol. 1, no. 3, pp. 241–246, 2010.

- [10] A. Bhattacharjee, M. Ahmaruzzaman, and T. Sinha, "A novel approach for the synthesis of SnO₂ nanoparticles and its application as a catalyst in the reduction and photodegradation of organic compounds," *Spectrochim. Acta Part A Mol. Biomol. Spectrosc.*, vol. 136, pp. 751–760, 2015.
- [11] M. Farbod and S. Rezaian, "An investigation of super-hydrophilic properties of TiO₂/SnO₂ nano composite thin films," *Thin Solid Films*, vol. 520, pp. 1954– 1958, 2012.
- [12] S. El-Sherbiny, F. Morsy, M. Samir, and O. A. Fouad, "Synthesis, characterization and application of TiO₂ nanopowders as special paper coating pigment," *Appl. Nanosci.*, vol. 4, pp. 305–313, 2014.
- [13] J. Liang, J. Wang, M. Zhou, Y. Li, X. Wang, and K. Yu, "A graphene-SnO₂-TiO₂ ternary nanocomposite electrode as a high stability lithium-ion anode material," *J. Alloys Compd.*, vol. 673, pp. 144–148, 2016.
- [14] W. J. Moon, J. H. Yu, and G. M. Choi, "Selective Gas Detection of SnO₂-TiO₂ Gas Sensors," *J. Electroceramics*, vol. 13, pp. 707–713, 2004.
- [15] A. Kusior *et al.*, "Sensitization of gas sensing properties in TiO₂/SnO₂ nanocomposites," in *Procedia Engineering*, 2012, vol. 47, pp. 1073–1076.
- [16] S. Nasirian and H. M. Moghaddam, "Polyaniline assisted by TiO₂:SnO₂ nanoparticles as a hydrogen gas sensor at environmental conditions," *Appl. Surf. Sci.*, vol. 328, pp. 395–404, 2015.
- [17] W. Sha, S. Ni, and C. Zheng, "Chemical Development of cataluminescence sensor system for benzene and toluene determination," *Sensors Actuators B. Chem.*, vol. 209, pp. 297–305, 2015.
- [18] X. Wang, Y. Sang, D. Wang, S. Ji, and H. Liu, "Enhanced gas sensing property of SnO₂ nanoparticles by constructing the SnO₂ – TiO₂ nanobelt heterostructure," *J. Alloys Compd.*, vol. 639, pp. 571–576, 2015.
- [19] I. M. A. Mohamed, V.-D. Dao, A. S. Yasin, H.-S. Choi, and N. A. M. Barakat, "Synthesis of novel SnO₂@TiO₂ nanofibers as an efficient photoanode of dyesensitized solar cells," *Hydrog. Energy*, pp. 1–12, 2016.
- [20] K. Zakrzewska and M. Radecka, "TiO₂-Based Nanomaterials for Gas Sensing

— Influence of Anatase and Rutile Contributions," *Nanoscale Res. Lett.*, pp. 1– 8, 2017.