

АНОТАЦІЯ

Грицак (Топоровська) Л. Р. Синтез і характеристика матеріалів з різною розмірністю на основі ZnO. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 105 “Прикладна фізика та наноматеріали” (10 – Природничі науки). – Львівський національний університет імені Івана Франка, Львів, 2020.

Робота присвячена цілеспрямованій модифікації оптико-спектральних, електричних, теплопровідних та фотокаталітичних властивостей оксиду цинку шляхом пониження розмірності системи і змін технологічних процесів для отримання ефективних багатофункціональних матеріалів для оптоелектронних приладів.

В результаті досліджень електричних і теплопровідних властивостей композитів на основі нано- та мікропорошків оксиду цинку було виявлено прояв розмірного ефекту. Зокрема, встановлено, що підвищення величини коефіцієнта теплопровідності композиту при використанні нано- замість мікропорошку ZnO зумовлене балістичною теплопровідністю, зростанням екситонної теплопровідності та зменшенням контактного теплового опору. Менші значення питомого об’ємного електричного опору та вищі значення діелектричної проникності синтезованих композитів порівняно з параметрами термопасти КПТ-8 було пояснено наявністю у їхньому складі деякої кількості води, що може адсорбуватися на поверхні порошків ZnO в процесі їхнього виготовлення.

Проведено дослідження низькотемпературних спектрів фотолюмінесценції наноструктур ZnO, вирощених гідротермічним методом. Виявлено два чітко виражені піки: більш інтенсивний з максимумом при 3,36 еВ і менш інтенсивний при 3,32 еВ. Інтенсивна смуга з максимумом при 3,36 еВ зумовлена рекомбінацією екситонів *A*, зв’язаних

на нейтральному донорі ($D_2^0 X_A$). Для аналізу менш інтенсивної смуги при 3,2 еВ успішно використано теорію двоелектронних переходів (TES), згідно з якою цю смугу інтерпретують як збуджений стан зв'язаного на нейтральному донорі екситона після двоелектронного переходу $(D_2^0 X_A)_{2e}$. На основі наближення гідрогенної ефективної маси визначено енергію зв'язку донора. Енергію активації термічного гасіння ($E_a = 14$ меВ) було отримано з оберненої температурної залежності інтенсивності фотолюмінесценції. Важливо відзначити, що отримане значення E_a добре узгоджується з енергією локалізації екситона на дефекті, оскільки відомо, що енергія зв'язку екситона для комплексів з дефектними парами коливається від 10 до 20 меВ.

На основі проведених досліджень термостимульованої люмінесценції (ТСЛ) наноструктур ZnO, вирощених з парової фази на сапфіровій підкладці, отримана інформація про природу їхньої “зеленої” смуги випромінювання. Визначено параметри центрів прилипання: енергію іонізації пасток, переріз захоплення носіїв заряду пасткою та частотний фактор. Їхні значення виявилися рівними $E = 0,32 \pm 0,03$ еВ, $S = 6 \times 10^{-18}$ см², $\omega_0 = 1,9 \times 10^6$ с⁻¹, відповідно. Встановлено, що за структуру спектра ТСЛ, а також за зелену смугу свічення нанодротів ZnO, відповідальна пастка з енергетичним рівнем $3,05 \pm 0,03$ еВ, відрахованим від дна зони провідності. Зокрема, з точністю до похибки, отримане значення енергетичного рівня збігається з положенням енергетичного рівня вакансій цинку V_{Zn} в ZnO ($E = 3,06$ еВ). З аналізу ТСЛ та характерних параметрів центрів прилипання зроблено висновок, що за зелену смугу випромінювання відповідають електронні переходи з донорних рівнів Zn_i^+ на акцепторні рівні V_{Zn} . Отримані результати досліджень люмінесценції наноструктур ZnO є важливими для створення ефективних світлодіодів та лазерів на їхній основі.

Досліджено вплив іонного бомбардування на фотокаталітичні властивості наноструктур оксиду цинку, вирощених з парової фази та гідротермічним методом. Розраховано константи швидкості реакції для наноструктур ZnO, вирощених з парової фази та гідротермічним методом: $5,3 \times 10^{-5} \text{ c}^{-1}$ і $3,7 \times 10^{-4} \text{ c}^{-1}$, відповідно, які отримані з використанням апроксимації першого порядку. Встановлено, що після короткої обробки поверхні іонами аргону константи швидкості реакції зростають (до $1,85 \times 10^{-4} \text{ c}^{-1}$ і $5,9 \times 10^{-4} \text{ c}^{-1}$ відповідно).

В результаті аналізу спектрів фотолюмінесценції наноструктур оксиду цинку, вирощених з парової фази та гідротермічним методом, було встановлено, що відмінність у фотокаталітичних властивостях зумовлена переважанням дефектів різних типів на поверхні. Зокрема, встановлено, що для наностержнів ZnO, вирощених з парової фази переважаючими дефектами поверхні є вакансії цинку, а для наностержнів, вирощених гідротермічним методом – висока концентрація гідроксильних груп. Виявлено вагомий вплив іонного бомбардування на фотокаталітичну активність наноструктур ZnO, який пояснюється утворенням вакансій кисню на їхній поверхні. Встановлено, що для адсорбції ОН-груп такі дефекти, як вакансії кисню є сприятливими, що приводить до підвищення фотокаталітичної активності зразків, вирощених як гідротермічним методом, так і з парової фази.

Дослідження впливу електричного поля на фотокаталітичну активність мікроструктур ZnO, синтезованих з парової фази, продемонстрували збільшення ефективності фотодеградації барвника. Аналіз абсорбційних спектрів водного розчину барвника від часу опромінення засвідчив поступове зниження та зміщення максимуму поглинання барвника в довгохвильову область, що пов'язують з утворенням побічного продукту під час процесу деградації. Встановлено, що зменшення абсорбції вказує на зниження концентрації барвника (метилоранжу), яке візуально підтверджувалося знебарвленням

реакційного розчину. Розраховано константи швидкості реакції, у випадку прикладанням електричного поля та за його відсутності: $8,83 \times 10^{-3} \text{ хв}^{-1}$ і $5,08 \times 10^{-3} \text{ хв}^{-1}$ відповідно. Виявлений значний ефект підвищення швидкості розкладання барвника під дією електричного поля зумовлений ефективнішим перерозподілом зарядів та більшою кількістю гідроксильних радикалів на поверхні каталізатора.

Проведено фрактальний аналіз поверхні синтезованих нано- і микроструктур оксиду цинку. Встановлено, що серед усіх проаналізованих мікро- і наноструктур на основі ZnO найбільше значення фрактальної розмірності та співвідношення площі поверхні до площі проекції притаманне наностержням та нанодротам, що є ключовим фактором при застосуванні цих структур не тільки як фотокаталізаторів, але й і в багатьох інших напрямках, таких сенсорна техніка, створення світловипромінювальних пристроїв чи елементів сонячних батарей. Гідротермічний метод синтезу проявив себе як перспективний та недорогий методом для синтезу ефективних фотокаталізаторів.

Розроблено технологію отримання нанокompatитних фотокаталізаторів на основі оксиду цинку та поруватого кремнію (ZnO/p-Si). Підтверджено, що від площі поверхні каталізатора, освітленої джерелом світла, залежатиме кількість згенерованих електронно-діркових пар і, відповідно, й каталітична активність композитного фотокаталізатора. Продемонстровано, що “наноквіти” ZnO мають більш розвинену поверхню порівняно з плівками чи вертикально орієнтованими наностержнями оксиду цинку. У результаті порівняння фотокаталітичних властивостей двох видів композитів встановлено, що зростання ефективності фотодеградації барвника приблизно на 30 % за використання композитного фотокаталізатора на основі “наноквітів” ZnO та поруватого кремнію замість композитного фотокаталізатора на основі плівки ZnO і поруватого кремнію зумовлене більшою величиною ефективною площею поверхні “наноквітів” ZnO.

Розроблено технологію отримання нанокompозитних фотокаталізаторів на основі наностержнів оксиду цинку та бішару оксиду графену (ZnO/rGO). Визначено ефективний показник заломлення та товщину бішару rGO (1,8 та 13 нм, відповідно) на основі вимірювань еліпсометрії “ex situ” шарів rGO на аморфній кварцовій пластині із застосуванням одношарової моделі. Оцінено поглинання відновленого оксиду графену у видимому спектральному діапазоні та розрахована мінімальна енергія електронного переходу ($E_{et} = 2,4$ eV). Досліджено каталітичні властивості нанокompозита при деградації метилоранжу та здійснено порівняльний аналіз з характеристиками окремо взятих бішару rGO та наноструктур ZnO. Результати аналізу засвідчили, що нанокompозит ZnO/rGO має значно вищу фотокаталітичну ефективність, ніж інші зразки. Показано, що ефективність фотодеградації для нанокompозита ZnO/rGO зросла на ~ 20 % порівняно з ефективністю чистого шару наноструктур ZnO. Обраний нами метод синтезу забезпечує ефективний процес перенесення електронів між шарами ZnO та rGO. Розраховані константи швидкості реакції свідчать про те, що ZnO і rGO функціонують синергетично у виготовленому нанокompозитному фотокаталізаторі.

Інноваційний аспект викладених в роботі матеріалів підтверджується двома отриманими патентами на корисні моделі на основі проведених досліджень. Цінність отриманих результатів, викладених у роботі, пов'язана насамперед з дослідженням властивостей наноструктур на основі ZnO, отриманих з використанням дешевих методів синтезу. Отримано патент на корисну модель, яка стосується способу виготовлення ефективного фотокаталізатора з розвинутою поверхнею на основі “наноквітів” оксиду цинку та поруватого кремнію. Інший патент на корисну модель – спосіб виготовлення композитного фотокаталізатора на основі наностержнів оксиду цинку та відновленого бішару оксиду графену.

Розроблено і протестовано прототипи термопасти на основі мікро- і нанопорошку ZnO. Результати тестування засвідчують перспективність

застосування композитів на основі нанопорошків для відведення тепла в комп'ютерах та інших електронних пристроях.

Дослідження люмінесценції наноструктур ZnO, синтезованих доступними і дешевими методами “мочної” хімії (гідротермічним методом), стануть основою для використання таких зразків для створення ефективних світлодіодів та лазерів.

Ключові слова: оксид цинку, наноструктури, теплопровідність, фрактальний аналіз, фотолюмінесценція, термолюмінесценція, фотодеградація, фотокаталіз, нанокомпозити.

ABSTRACT

Hrytsak (Toporovska) L. R. Synthesis and characterization of materials with different dimensionality based on zinc oxide. – Manuscript copyright.

Thesis for the Doctor of Philosophy, specialty 105 “Applied Physics and Nanomaterials” (10 – Natural Sciences) – Ivan Franko National University of Lviv, Lviv, 2020.

The work is devoted to the purposeful modification of the optical-spectral, electric, heat conductivity and photocatalytic properties of zinc oxide by means of lowering of system dimensionality and changes of the technological processes in order to obtain the effective multifunctional materials for the optoelectronics.

The investigations of the electrical and thermal conductive properties of composites based on nano- and micropowders of zinc oxide revealed manifestation of the dimensional effect. It was established that growth of the thermal conductivity of the the nanocomposites of ZnO in comparison with the microcomposites was caused by ballistic thermal conductivity, increasing of the exciton thermal conductivity and a decreasing of the contact thermal resistance. Lower values of the specific bulk electrical resistance and higher values of the dielectric constant of the synthesized composites in comparison with the parameters of the KPT-8 thermal paste is connected with presence in their composition of some water that can be adsorbed on the surface of ZnO powders during their manufacture.

The low temperature photoluminescence spectra of ZnO nanostructures grown by hydrothermal method were investigated. There were observed the two distinct peaks: more intensive one with a maximum of 3,36 eV and less intensive at 3,32 eV. The intensive band with the maximum at 3,36 eV has been related to the neutral donor-bound exciton transition ($D_2^0 X_A$). The two-electron transition theory (TES) has been successfully used for analysis of the less intensive band at 3,2 eV. This band was related to the excited state of the exciton bound at a neutral donor after a two-electron transition ($(D_2^0 X_A)_{2e}$). The hydrogenic effective mass approximation was used

to determine the binding energy of the donor. The activation energy of thermal decay ($E_a=14$ meV) was obtained from the dependence of the inverse temperature dependence of the photoluminescence intensity. It is important to note that the obtained E_a value was found to be in a good agreement with the energy of exciton localization on the defect, since it is known that the exciton binding energy for the complexes with defect pairs ranges from 10 to 20 meV.

Study of the thermally stimulated luminescence (TSL) of ZnO nanostructures grown from a vapor phase on a sapphire substrate provided information about the nature of their green emission band. The parameters of the adhesion centers are determined: the trap ionization energy, the trap carrier trapping cross section and the frequency factor. Their values were equal to $E = 0,32 \pm 0,03$ eV, $S = 6 \times 10^{-18}$ cm², $\omega_0 = 1,9 \times 10^6$ s⁻¹, respectively. It was established that the trap with an energy level of $3,05 \pm 0,03$ eV, calculated from the bottom of the conduction band, is found to be responsible for the appearance of the TSL for the green luminescence of ZnO nanowires. In particular, the obtained value of the energy level with accuracy within the framework of experimental error coincides with position of the energy level ($E = 3,06$ eV) of zinc vacancies V_{Zn} in ZnO. On the basis of TSL analysis and the characteristic parameters of the adhesion centers, it was concluded that the green emission band is caused by the electronic transitions from donor Zn_i^+ levels to V_{Zn} acceptor levels. The investigations of ZnO nanostructures luminescence are important for creating of the effective LEDs and lasers based on them.

The effect of ion etching on the photocatalytic properties of zinc oxide nanostructures grown from a vapor phase and by the hydrothermal methods have been investigated. The reaction rate constants for as grown ZnO nanorods deposited from a vapor phase and by the hydrothermal method were calculated using the first-order approximation: $5,3 \times 10^{-5}$ and $3,7 \times 10^{-4}$ s⁻¹ respectively. It was found that after a brief treatment of the samples surface by argon ions the reaction rate constant values increased to $1,85 \times 10^{-4}$ and $5,9 \times 10^{-4}$ s⁻¹ respectively.

Analysis of the photoluminescence spectra of zinc oxide nanostructures grown from a vapor phase and by the hydrothermal methods revealed that the difference in photocatalytic properties arises due to the predominance of defects of different types on the surface. It was found that zinc vacancies were predominant for ZnO nanorods grown from a vapor phase, whereas for ZnO nanorods grown by hydrothermal method – a high concentration of hydroxyl group plays the most important role. Significant influence of the ion etching on the photocatalytic activity of ZnO nanostructures was revealed. It was explained by the formation of oxygen vacancy on the surface of ZnO nanostructures. The defects such as oxygen vacancies are found to be kinetically favorable that caused increasing of the photocatalytic activity of the samples grown by both the hydrothermal method and from a vapor phase.

Investigations of the electric field impact on the photocatalytic activity of ZnO microstructures synthesized by gas-transport reactions showed an increase in the photodegradation efficiency of the dye. Analysis of the absorption spectra of the aqueous dye solution as a function of time of irradiation showed a gradual decrease and shift of the absorption maximum of the dye toward the longwave region, which was associated with formation of the additional decay products during the degradation process. It was found that the constant diminishing of absorption reflects decrease of the dye (methyl orange) concentration, which was visually confirmed by the discoloration of the reaction solution. The rate constants were calculated in the case of electric field application and without the field: $5,08 \times 10^{-3} \text{ min}^{-1}$ and $8,83 \times 10^{-3} \text{ min}^{-1}$ respectively. A significant effect of the dye decomposition rate increasing under the action of an electric field has been found, which was associated with a more efficient charge redistribution and more high hydroxyl radicals' concentration on the catalyst surface.

The fractal analysis of the surface of the synthesized nano- and microstructures of zinc oxide was performed. Among the all investigated micro- and nanostructures based on ZnO the largest values of the fractal dimension and the ratio of the surface area to the projection area were found to be for the the nanorods and nanowires that would be considered as a key factor at application of these structures not only as the

photocatalysts but in other directions such as sensor technique, creation of the light emitting devices or solar cells. The hydrothermal synthesis has proven to be a promising and inexpensive method for the synthesis of efficient photocatalysts.

The technology of producing of the nanocomposite photocatalysts based on zinc oxide and porous silicon ($\text{ZnO}/p\text{-Si}$) have been developed. It was confirmed that the surface area of the catalyst illuminated by the light source depends on the number of electron-hole pairs generated and, accordingly, on the catalytic activity of the composite photocatalyst. ZnO nanowires are characterized by a more developed surface in comparison with the films composed of the vertically oriented zinc oxide nanorods. As a result of comparison of the photocatalytic properties of these two types of composites, it was found that increasing of the photodegradation efficiency by approximately 30 % in the case of the composite based on ZnO “nanoflowers” and porous silicon in comparison with the composite based on ZnO film and porous silicon is observed due to a larger effective surface area of ZnO “nanoflowers”.

The technology of production of the nanocomposite photocatalysts based on zinc oxide nanoparticles and graphene oxide bilayer (ZnO/rGO) have been developed. The effective refractive index and the thickness of the rGO were determined (1.8 and 13 nm, respectively) on the basis of the ellipsometry measurements of “ex situ” rGO layers on an amorphous quartz plate using a single-layer model.

The absorption of reduced graphene oxide in the visible spectral range was estimated and calculation of the minimal electron transition energy ($E_{\text{et}} = 2.4 \text{ eV}$) was determined. The catalytic properties of the nanocomposite in the degradation of methyl orange were investigated and the comparative analysis of bilayer rGO and ZnO nanostructures was carried out. The obtained results clearly indicate that ZnO/rGO nanocomposite manifests a significantly higher photocatalytic efficiency than other samples. It has been shown that the photodegradation efficiency for ZnO/rGO nanocomposites increased by ~ 20% compared to the efficiency of the pure ZnO nanostructure layer. Our synthesis method offers an efficient electron transfer process between ZnO and rGO layers. The determined values of the rate constants of

the reaction testify that ZnO and rGO function synergistically in the fabricated nanocomposite photocatalyst.

The innovative aspect of the materials, presented in this work, is confirmed by two patents of utility models obtained on the basis of the performed research. The value of the obtained results first of all is connected with study of the properties of ZnO-based nanostructures obtained using the cheap synthesis methods. The patent for a utility model concerns the method of manufacturing of the effective photocatalyst with a developed surface based on the “nanoflowers” of zinc oxide and porous silicon. Another utility model patent is a method of manufacturing of a composite photocatalyst based on zinc oxide nanorods and reduced graphene oxide bilayer.

The prototypes of the thermal paste based on ZnO micro- and nanopowder were developed and tested. The test results testify to the prospects for the nanopowder composites application for heat removal in computers and other electronic devices.

Studies of the luminescence of ZnO nanostructures synthesized by simple and cheap methods of “wet” chemistry (hydrothermal method) will be the basis for application of such samples for creation of the efficient LEDs and lasers.

Keywords: zinc oxide, nanostructures, thermal conductivity, fractal analysis, photoluminescence, thermoluminescence, photodegradation, photocatalysis, nanocomposites.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Публікації, що відображають основні наукові результати дисертації

Публікації у наукових фахових виданнях України

1. Панасюк М.Р. Термостимульована люмінесценція нанодротів ZnO / М. Р. Панасюк, Б. І. Турко, **Л. Р. Топоровська**, В. Б. Капустяник, М. С. Рудко // *Журнал нано- та електронної фізики*. – 2017. – Т. 9, №2. – С. 02018. – 3 с.
2. **Toporovska L.** Photocatalytic Properties of Zinc Oxide Nanorods Grown by Different Methods / L. Toporovska, A. Hrytsak, B. Turko, V. Rudyk, V. Tsybulskyi, R. Serkiz // *Optical and Quantum Electronics*. – 2017. – V. 49. – Art. 408. – 10 p.
3. **Топоровська Л.** Фотокаталітичні властивості нанокompatитного фотокаталізатора на основі ZnO і поруватого кремнію / Л. Топоровська, Б. Турко, П. Парандій, Р. Серкіз, В. Капустяник, М. Рудко // *Журнал фізичних досліджень*. – 2018. – Т. 22, №1. – С. 1601. – 4 с.
4. Turko B. I. Photoluminescence Study of ZnO Nanostructures Grown by Hydrothermal Method / B. I. Turko, V. B. Kapustianyk, **L. R. Toporovska**, V. P. Rudyk, V. S. Tsybulskyi, R. Y. Serkiz // *Journal of Nano- and Electronic Physics*. – 2018. – V. 10, No 2. – Art. 02002. – 4 p.
5. **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, Art. 21. – 12 p.
6. **Топоровська Л.** Мікрострижні ZnO як ефективний матеріал для фотоелектрокаталітичного очищення води / Л. Топоровська, Б. Турко, В. Капустяник, М. Рудко, Р. Серкіз // *Журнал фізичних досліджень*. – 2020. – Т. 24, № 3. – С. 3701. – 5 с.

Патенти

7. Патент на корисну модель №122252 Україна, МПК C01B 33/00, C30B 29/06 (2006.01), B82B 3/00, B82Y 30/00, B82Y 40/00. Спосіб отримання композитного фотокаталізатора. Турко Б. І., **Топоровська Л. Р.**, Парандій П. П., Серкіз Р. Я., №u201707821 Заявл. 11.08.2017 р. Опубл. 26.12.2017, Бюл. №24. Власник ЛНУ імені Івана Франка.
8. Патент на корисну модель №136616 Україна, МПК C01B 33/00, C01G 9/02 (2006.01), B82Y 30/00. Спосіб отримання композитного фотокаталізатора. **Топоровська Л. Р.**, Турко Б. І., Серкіз Р. Я., Капустяник В. Б. №u201902501 Заявл. 14.03.2019 р. Опубл. 27.08.2019, Бюл. №16. Власник ЛНУ імені Івана Франка.

Публікації, що засвідчують апробацію матеріалів дисертації

9. Капустяник В. Б. Електрофізичні властивості та перспективи застосування теплопровідних композитів на основі нано- та мікропорошків цинк оксиду / В. Б. Капустяник, Б. І. Турко, **Л. Р. Топоровська**, Р. Я. Серкіз, О. Б. Перевізник, А. П. Васьків, Ю. В. Рудик // *Журнал фізики та інженерії поверхні*. – 2018. – Т. 3, №1. – С. 4–10.
10. **Топоровська Л. Р.**, Грицак А. М., Турко Б. І. Вплив іонного травлення на фотокаталітичні властивості мікроструктур ZnO // Тези доп. науково-технічної конференції “Фізика, електроніка, електротехніка”, Суми, 17-21 квітня 2017. – С. 31 (*стендова доповідь*).
11. **Топоровська Л. Р.**, Капустяник В. Б., Панасюк М. Р., Турко Б. І., Рудко М. С. Термоситимувована люмінесценція нанодротів ZnO // Тези доп. XI Міжнародної науково-практичної конференції магістрантів та аспірантів, Харків, 18-21 квітня 2017. – С. 186 -187 (*стендова доповідь*).
12. **Toporovska L.**, Savchak M., Luzinov I., Turko B., Kapustianyk V., Ma R., Tsukruk V. Photocatalytic Properties of ZnO Nanostructures and

- Nanocomposites Based on Zinc and Reduced Graphene Oxides // Abstracts of International Conference of Students and Young Scientists in Theoretical and Experimental Physics “Heureka-2017”, Lviv, 16-18 May, 2017, P. C4 (*усна доповідь*).
13. **Toporovska L. R.**, Hrytsak A. M., Turko B. I., Rudyk V. P., Tsybulskiy V. S., Serkiz R. Y. Comparison of Photocatalytic Properties ZnO Nanorods Fabricated by Different Methods // Abstracts of International Research and Practice Conference “Nanotechnology and Nanomaterials” (NANO-2017), Chernivtsi, August 23-26, 2017, P. 326 (*стендова доповідь*).
14. **Топоровська Л.**, Парандій П., Турко Б., Серкіз Р. Фотокаталітичні властивості нанокompозиту на основі оксиду цинку та поруватого кремнію // Тези доп. ІХ Українсько-польської науково-практичної конференції “Електроніка та інформаційні технології” (ЕЛІТ-2017), Львів-Чинадієво, Україна, 28 – 31 серпня, 2017, С. 214 215 (*стендова доповідь*).
15. Kapustianyk V. B., Turko B. I., **Toporovska L. R.**, Nastishin Y. A. Sensors Based on ZnO Nanostructures for Explosives Trace Detection // Тези доп. науково-практичної конференції “Застосування Сухопутних військ Збройних Сил України у конфліктах сучасності”, Львів, Україна, 16 листопада, 2017, С. 104-105 (*стендова доповідь*).
16. **Топоровська Л. Р.**, Садовий Б. С., Турко Б. І., Серкіз Р. Я., Капустяник В. Б., Ніколенко А. С., Циканюк Б. І., Стрельчук В. В. Створення і характеристика наноструктур *n*-ZnO на підкладках *p*-GaN // Тези доп. конференції молодих вчених з фізики напівпровідників "Лашкарьовські читання 2018", Київ, Україна, 4-6 квітня, С. 26 (*усна доповідь*).
17. Turko B. I. Kapustianyk V. B., **Toporovska L. R.**, Rudyk V. P., Tsybulskiy V. S., Serkiz R. Y. Photoluminescence Study of ZnO Nanostructures Grown by Hydrothermal Method // Abstracts of IX

International Conference for Professionals & Young Scientists “Low Temperature Physics”, June 4–8, 2018, Kharkiv, P. 125 (*усна доповідь*).

18. **Топоровська Л.**, Savchak M., Luzinov I., Turko B., Kapustianyk V. Photocatalytic Properties of Nanocomposite Based on Zinc Oxide Nanostructures and Reduced Graphene Oxide Bilayer // Abstracts of International Conference of Students and Young Researchers in Theoretical and Experimental Physics “Heureka-2019”, May 14-16, 2019, Lviv, P. C8 (*усна доповідь*).
19. **Топоровська Л.Р.** Фрактальний аналіз поверхні нано- і мікророзмірних структур ZnO для майбутнього застосування в фотокаталізі // Тези доп. IV Міжнародної науково-практичної конференції “Сучасні тенденції розвитку науки”, 25-26 квітня, 2020, Київ, С. 53-55 (*заочна доповідь*).