

**РІШЕННЯ РАЗОВОЇ СПЕЦІАЛІЗОВАНОЇ ВЧЕНОЇ РАДИ ДФ 36.053.040**  
**ПРО ПРИСУДЖЕННЯ СТУПЕНЯ ДОКТОРА ФІЛОСОФІЇ**

Разова спеціалізована вчена рада **ДФ 36.053.040** Дрогобицького державного педагогічного університету імені Івана Франка Міністерства освіти і науки України, м. Дрогобич у складі:

Голови разової спеціалізованої  
вченої ради -

**Ігоря СТОЛЯРЧУКА**, доктора фізико-математичних наук, професора, декана факультету фізики, математики, економіки та інноваційних технологій Дрогобицького державного педагогічного університету імені Івана Франка;

Рецензентів -

**Віталія ГОЛЬСЬКОГО**, кандидата фізико-математичних наук, доцента, завідувача кафедри фізики та інформаційних систем Дрогобицького державного педагогічного університету імені Івана Франка;

**Олесі ДАНЬКІВ**, кандидата фізико-математичних наук, доцента, доцента кафедри фізики та інформаційних систем Дрогобицького державного педагогічного університету імені Івана Франка,

Офіційних опонентів -

**Олександра МАХАНЦЯ**, доктора фізико-математичних наук, професора, професора

кафедри термоелектрики та медичної фізики Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича;

**Руслани БАЛАБАЙ**, доктора фізико-математичних наук, професора, професора кафедри фізики та методики її навчання Криворізького державного педагогічного університету.

на засіданні 25 березня 2026 року прийняла рішення про присудження ступеня доктора філософії **Галині БАНДУРІ** з галузі знань 10 Природничі науки за спеціальністю 105 Прикладна фізика та наноматеріали на підставі публічного захисту дисертації «**Електронні та діркові стани невзаємодіючих квантових точок та їх впорядкованих масивів**».

Дисертацію виконано у Дрогобицькому державному педагогічному університеті імені Івана Франка Міністерства освіти і науки України, м. Дрогобич.

Науковий керівник: **Ігор БІЛИНСЬКИЙ**, доктор фізико-математичних наук, професор, професор кафедри фізики та інформаційних систем. Дрогобицького державного педагогічного університету імені Івана Франка МОН України.

**Бандура Галина Ярославівна**, 1997 року народження, громадянка України, освіта вища. У 2020 році закінчила Дрогобицький державний педагогічний університет імені Івана Франка та отримала повну вищу освіту ступеню «Магістр» за спеціальністю «Середня освіта (Математика)» та здобула кваліфікацію вчителя математики, фізики та інформатики.

З 2020 року – асистент вчителя гімназії №10 імені Євгена Коновальця.

З 2021 до сьогодні – вчитель математики гімназії №10 імені Євгена Коновальця, а також аспірантка Дрогобицького державного педагогічного університету імені Івана Франка за спеціальністю 105 Прикладна фізика та наноматеріали.

Дисертацію подано у вигляді спеціально підготовленого рукопису, який за змістом, рівнем наукової новизни, теоретичним й практичним значенням результатів, кількістю наукових публікацій відповідає вимогам пункту 6 «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 року № 44 (зі змінами), та вимогам до оформлення дисертацій, затвердженим наказом Міністерства освіти і науки України від 12 січня 2017 року № 40 (зі змінами).

Дисертація Галини БАНДУРИ є завершеною науковою працею в межах поставлених завдань, представляє собою вагомий внесок у створенні теорії електронних і діркових станів в ізольованих квантових точках та у впорядкованих масивах квантових точок. Отримані результати мають важливе значення для галузі знань 10 Природничі науки та спеціальності 105 Прикладна фізика та наноматеріали.

У результаті проведених у дисертаційній роботі теоретичних досліджень **уперше** отримано такі **наукові результати**:

- визначено спільний вплив ефектів деформації та поляризації на межі поділу «квантова точка – матриця» на енергетичний спектр дірок у гетеросистемі InAs/GaAs. Доведено, що в наближенні проміжної спін-орбітальної взаємодії ці внески повністю нівелюють один одного при радіусах квантової понад 40 Å, тоді як для менших радіусів компенсація є лише частковою;
- здійснено порівняльний аналіз енергії основного діркового стану в моделях із сильною та проміжною спін-орбітальною взаємодією. Виявлено, що

для структури InAs/GaAs модель проміжної взаємодії дає занижені значення на 33% (для радіуса квантової точки 40 Å) та на 11% (для 60 Å). Для гетеросистеми GaAs/AlAs ця розбіжність є менш вираженою і складає 8% та 4% відповідно;

- у рамках моделі сильної спин-орбітальної взаємодії отримано кількісні оцінки розщеплення діркових енергетичних рівнів у сферичних квантових точках, зумовленого комбінованим впливом зовнішнього електричного поля та нецентрально розташованої акцепторної домішки;

- теоретично обґрунтовано наявність критичних параметрів (модуля та вектора) зовнішнього електричного поля, за яких у сферичних квантових точках знімається розщеплення та відновлюється виродження енергетичних рівнів дірки, попередньо викликане зміщенням акцептора від центру;

- розраховано спектри енергетичних мінізон для надґраток квантових точок InAs/GaAs кубічної та сферичної форм з однією квантовою точкою в елементарній комірці. Виявлено, що за умови однакового об'єму наночастинок, ширина s-подібних мінізон у надґратках із кубічними квантовими точками завжди перевищує цей показник для сферичних;

- з'ясовано закономірності впливу вимірності надґраток на ширину їхніх енергетичних мінізон: доведено, що незалежно від радіуса базових квантових точок, одномірні надґратки квантових точок з однією квантовою точкою у базисі характеризуються найвужчими зонами, а тривимірні — найширшими;

- розроблено теоретичну модель енергетичного мінізонного спектра для надґратки квантових точок зі складною елементарною коміркою, що містить дві квантові точки різних розмірів та матеріалів. Математичний апарат побудовано на основі методу сильного зв'язку у наближенні найближчих сусідів;

- встановлено явище розщеплення мінізони на дві підзони в надґратці квантових точок із двома відмінними квантовими точками у базисі. Доведено, що незалежно від параметрів системи, ширина верхньої новоутвореної зони стабільно перевершує ширину нижньої.

**Практична цінність роботи** полягає у формуванні надійного теоретичного підґрунтя для проєктування напівпровідникових наносистем на основі квантових точок із наперед заданими оптоелектронними властивостями. Розроблена аналітична модель, що враховує вплив нецентрального акцепторних домішок та орієнтації електричного поля, відкриває нові можливості для оптимізації процесів легування. Використання цих даних дозволить ефективно керувати фотолюмінесценцією у світлодіодних гетероструктурах, знижуючи енергетичні втрати на безвипромінювальну рекомбінацію.

Крім того, запропонована теорія формування електронних і діркових мінізон у надґратках квантових точок із простою та складною елементарною коміркою (одна або дві квантові точки у базисі) є ефективним інструментом для прогнозування характеристик пристроїв із проміжною зоною. Знайдені закономірності впливу просторової геометрії надґраток (одно-, дво- чи тривимірних) на ширину мінізон дають змогу конструювати матеріали з необхідними швидкостями електронного переносу. Це має важливе значення для створення елементної бази квантових комп'ютерів, швидкісних перемикачів та модулів пам'яті. В цілому, результати дослідження сприятимуть технологічному прогресу в розробці високоефективних сонячних елементів нового покоління, лазерних систем та гнучких сенсорних приладів.

Здобувачка має 13 наукових праць за темою дисертації: 5 статей (4 індексуються у базі Scopus/Web of Science, 2 з них у журналах з квантилями Q1-Q2, а 2 – у журналах з квантилями Q3-Q4; 1 у журналі категорії Б) та 8 робіт, що є матеріалами всеукраїнських чи міжнародних конференцій.

Кількість, обсяг та зміст друкованих праць відповідають вимогам Міністерства освіти і науки України щодо публікації основного змісту дисертації на здобуття наукового ступеня доктора філософії.

**Наукові статті, опубліковані у виданнях, що входять до списку наукових фахових видань України та проіндексованих у наукометричних базах даних Web of Science Core Collection та/або Scopus**

1. Bilynskyi I., Leshko R., Bandura H. Influence of quantum dot shape on energy spectra of three-dimensional quantum dots superlattices. *Physics and Chemistry of Solid State*. 2020. Vol. 21, No 4. P. 584–590. (Scopus/WoS, Q3).
2. Bilynskyi I., Leshko R., Bandura H. Electron and hole spectrum taking into account deformation and polarization in the quantum dot heterostructure InAs/GaAs. *Physics and Chemistry of Solid State*. 2023. Vol. 24, No 1. P. 146–152. (Scopus/WoS, Q3).

**Наукові статті, опубліковані у періодичних наукових виданнях, проіндексованих у наукометричних базах даних Web of Science Core Collection та/або Scopus**

3. Leshko R. Ya., Bandura H. Ya., Bilynskyi I. V., Karpyn A.V., Kvyk M.V., Melnyk Ya.Yu., Ocheretyanyi A.O., Popov M.Yu. Effect of arbitrarily directed electric field on hole spectra and absorption in a quantum dot with off-center impurity. *Physics Letters A*. 2025. Vol. 559. P. 130898:1-8. (Scopus/WoS, Q2).
4. Leshko R., Bandura H., Bilynskyi I., Slusarenko M. The band structure of a chain of periodically ordered different quantum dots. *Physica B: Condensed Matter*. 2024. Vol. 690. P. 416272:1-5. (Scopus/WoS, Q2).

**Наукові статті, опубліковані у виданнях, що входять до списку наукових фахових видань України категорії Б**

5. Leshko R. Ya., Bandura H. Ya., Bilynskyi I. V., Melnyk Ya. Yu., Kvyk M. V. The intersubband optical absorption coefficient of the QD with acceptor impurity under applied electric field. *Sensor Electronics and Microsystem Technologies*. 2024. Vol. 21, No 4. P. 14-24.

*Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації*

6. Bilynskyi I.V., Leshko R.Ya., Bandura H.Ya. The dependence of energy on the QD deformation and polarization charges. *XVII International Freik Conference on Physics and Technology of Thin Films and Nanosystems*. Ivano-Frankivsk, October 11-16, 2021. P. 11.
7. Bilynskyi I.V., Leshko R.Ya., Bandura H.Ya. Miniband energy spectrum of quantum dot chains containing two different quantum dot in basis. *IX Ukrainian Scientific Conference on Physics of Semiconductors*. Uzhhorod, Ukraine, May 22-26, 2023. P. 217.
8. Bilynskyi I.V., Leshko R.Ya., Bandura H.Ya. Theory of Superlattices with Two Atoms in the Basis. *XIX International Freik Conference on Physics and Technology of Thin Films and Nanosystems*. Ivano-Frankivsk, October 9-14, 2023. P. 84.
9. Bandura H., Bilynskyi I. Dependence of the intersubband optical absorption coefficient on the direction of the electric field in the GaAs/AlAs quantum dot heterostructure in the presence of an impurity. *VIII Всеукраїнська науково-практична конференція MEICS-2024*. Дніпро, 27-29 листопада 2024 р. С. 274-275.
10. Bandura H.Ya., Bilynskyi I.V. The influence of the electric field and the position of the acceptor on the energy spectrum and the intersubband optical absorption coefficient in the GaAs/AlAs quantum dot heterostructure. *Materials and Abstracts of Reports Presented at the International Conference (for the 100th anniversary of the birth of Professor Yu.M. Lomsadze)*. Uzhhorod, December 17-19, 2024. P. 221-222.
11. Bilynskyi I.V., Leshko R.Ya., Bandura H.Ya. An ordered array with two different quantum dots in a unit cell. *XI-th International Conference Topical Problems of Semiconductor Physics*. Drohobych, May 27-31, 2024. P. 58.

12. Bandura H. Ya., Bilynskyi I.V. Dependence of the energy spectrum of a quantum dot with an acceptor impurity on the angle of inclination of the electric field. «*Lashkaryov's readings*». *Young Scientists Conference on Semiconductor Physics*. Kyiv, April 3-4, 2025. P. 35-36.
13. Bandura H. Ya., Leshko R. Ya., Bilynskyi I.V. The energy spectra and band characteristics of two- and threedimensional superlattices of inhomogeneous quantum dots // *XX International Freik Conference on Physics and Technology of Thin Films and Nanosystems*. Ivano-Frankivsk, October 06-10, 2025. P. 74.

**У дискусії взяли участь голова і члени спеціалізованої вченої ради та висловили зауваження:**

**1. Столярчук Ігор Дмитрович**, доктор фізико-математичних наук, професор, декан факультету фізики, математики, економіки та інноваційних технологій Дрогобицького державного педагогічного університету імені Івана Франка, голова спеціалізованої ради, без зауважень.

**2. Маханець Олександр Михайлович**, доктор фізико-математичних наук, професор, професор кафедри термоелектрики та медичної фізики Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича, офіційний опонент.

Зауваження, висловлені у відгуку опонента:

1. У деяких місцях дослідження доцільно було б чіткіше розмежувати область застосування однозонної та багатозонної моделей.

2. У роботі досліджено вплив нецентральної акцепторної домішки та довільно напрямленого електричного поля на енергетичний спектр дірки. Для кращого розуміння місця одержаних результатів серед наявних теорій доцільно було б порівняти результати з відповідними електронними станами у КТ з донорною домішкою й електричним полем.

3. Виникає запитання, а чи можна використовувати метод плоских хвиль до надгратки КТ, що містять декілька КТ в базисі?

4. У дисертації трапляються поодинокі граматичні та орфографічні неточності, які не впливають на змістовність викладеного матеріалу.

**3. Балабай Руслана Михайлівна**, доктор фізико-математичних наук, професор, професор кафедри фізики та методики її навчання Криворізького державного педагогічного університету, офіційний опонент.

Зауваження, висловлені у відгуку опонента:

1. У дисертації використовується модель прямокутних потенціальних ям та бар'єрів. У реальних гетероструктурах профіль потенціалу на межах може бути більш плавним через міжфазну дифузію та сегрегацію атомів. Хоча для якісного аналізу модель прямокутних ям є цілком виправданою, цікавим напрямком подальших досліджень могло б бути врахування більш реалістичних профілів потенціалу.

2. У розділі 5 розглядаються надгратки з двома різними КТ в базисі. Хотілося б зрозуміти, як вбачає дисертантка проведення дослідження впливу порядку розташування квантових точок у надгратці (наприклад, АВАВАВ... проти ААВВААВВ...) на мінізонну структуру. Цей аспект міг би мати практичне значення для дизайну багаточарових структур.

3. У роботі містяться окремі неточності у формулюваннях. Наприклад, у вступі зазначено: "Вони зображають собою малі напівпровідникові структури..." – коректніше було б "представляють собою" або "є". Також у деяких місцях зустрічаються стилістичні недоліки, які не впливають на зміст, але потребують редакційного опрацювання.

**4. Гольський Віталій Богданович**, кандидат фізико-математичних наук, доцент, завідувач кафедри фізики та інформаційних систем Дрогобицького

державного педагогічного університету імені Івана Франка, офіційний рецензент.

Зауваження, висловлені у рецензії:

1. У теорії впорядкованих масивів КТ використано наближення найближчих сусідів, яке є стандартним і фізично обґрунтованим для слабкого тунелювання. Водночас для щільних надґраток вклад далеких сусідів може впливати на форму мінізон. Доцільним було б стисло прокоментувати очікувані зміни мінізонної структури при виході за межі цього наближення.

2. Поляризаційні та деформаційні ефекти проаналізовано в рамках континуальних моделей, що є поширеним підходом у фізиці гетероструктур. Однак для надмалих КТ атомістичні ефекти можуть призводити до кількісних відхилень. Було б доречно зазначити, для яких мінімальних розмірів КТ застосований континуальний опис залишається коректним.

3. У дисертаційній роботі переважно використано міжнародно усталену термінологію та позначення, однак у деяких місцях спостерігається варіативність у виборі символів для фізичних величин. Було б доцільно уніфікувати позначення по всьому тексту, а не тільки у рамках розділів, для підвищення зручності сприйняття матеріалу читачем.

**5. Даньків Олеся Омелянівна**, кандидат фізико-математичних наук, доцент, доцент кафедри фізики та інформаційних систем Дрогобицького державного педагогічного університету імені Івана Франка, офіційний рецензент.

Зауваження, висловлені у рецензії:

1. У розділі 4 досліджуються ідеалізовані періодичні надґратки квантових точок із повністю впорядкованими параметрами. Вплив слабкого безладу (розкиду радіусів КТ, флуктуацій міжточкових відстаней або глибини потенціальних ям) на мінізонний спектр не аналізується. Водночас навіть слабкий безлад у реальних масивах КТ може призводити до істотного розмиття

мінізонної структури або часткової локалізації станів квазічастинок. Разом із тим обраний авторкою підхід є виправданим для встановлення фундаментальних закономірностей формування енергетичних спектрів квазічастинок і механізмів їх розщеплення.

2. Формула (2.26) записана некоректно. По-перше, нижній індекс  $j$  є зайвим, оскільки в цьому розділі розглядаються виключно діркові стани валентної зони й жодного поділу за типом зони не вводиться. По-друге, у формулі зсув енергетичних рівнів записано через абсолютні значення як деформації, так і деформаційного потенціалу. Такий запис фактично усуває інформацію про знак відповідних величин і призводить до того, що знак деформації та знак деформаційного потенціалу не впливають на результат. Фізично ж зсув валентної зони визначається добутком деформації та деформаційного потенціалу і може мати як додатний, так і від'ємний знак залежно від характеру деформації та матеріалу. Запис у вигляді (2.26) може бути коректним лише за умови наперед відомого характеру деформації як у квантовій точці, так і в матриці.

3. У розділі 2 детально враховано вплив поляризаційних зарядів на гетеромежі та деформаційного потенціалу, зумовленого неузгодженням сталих ґраток КТ і матриці, на енергетичний спектр. Водночас у розділі 3 при розгляді дірки в КТ GaAs/Alas ці ефекти не враховуються, хоча наявність акцепторної домішки з ненульовим ефективним об'ємом та зовнішнього електричного поля може суттєво змінювати ефективність поляризаційної взаємодії та величину деформації.

Результати відкритого голосування:

«За» - 5 членів ради;

«Проти» - немає;

«Утрималися» - немає.

На підставі результатів відкритого голосування разова спеціалізована вчена рада ДФ 36.053.040 Дрогобицького державного педагогічного університету імені Івана Франка Міністерства освіти і науки України, м. Дрогобич присуджує **Бандурі Галині Ярославівні** ступінь **доктора філософії** з галузі знань 10 Природничі науки за спеціальністю 105 Прикладна фізика та наноматеріали.

Голова разової спеціалізованої  
вченої ради ДФ 36.053.040



Ігор СТОЛЯРЧУК

Дрогобицький державний  
педагогічний університет  
імені Івана Франка  
Підпис *Столярчук*  
**ЗАСВІДЧУЮ**  
Учений секретар *С*

