



ЗАТВЕРДЖУЮ

Проректор з науково-педагогічної роботи

В.Л. Шаран

ініціали та прізвище

25 жовтня 2020 р.

## РОБОЧА ПРОГРАМА НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ

### СИНЕРГЕТИЧНІ ПРИНЦИПИ ФОРМУВАННЯ НАНОСТРУКТУР

Назва

Галузь знань 10 Природничі науки  
 Спеціальність 104 Фізика та астрономія  
 Освітня програма Фізика та астрономія  
 Статус дисципліни Вибіркова  
 Навчально-науковий інститут фізики, математики, економіки та інноваційних технологій  
 Кафедра фізики  
 Мова навчання українська  
 Дані про вивчення дисципліни

Форма навчання	Курс	Семестр	Обсяг дисципліни: год / кредити ЄКТС	Кількість годин						Курсова робота	Вид семестрового контролю	
				Аудиторні заняття					Самостійна робота		Залік	Екзамен
				Разом	Лекції	Лабораторні роботи	Практичні заняття	Семінарські заняття				
Денна	2	3	90 / 3	30	14	–	16	–	60	–	+	–

Робоча програма складена на основі освітньої програми та навчального плану підготовки докторів філософії (240 кредитів ЕКТС).

Розробники:

Р.М. Пелешак, доктор фізико-математичних наук, професор  
 Ініціали та прізвище викладача, науковий ступінь та вчене звання

Погоджено керівником групи забезпечення спеціальності:

Р.М. Пелешак, доктор фізико-математичних наук, професор  
 Ініціали та прізвище, науковий ступінь та вчене звання

Схвалено на засіданні кафедри фізики.

Протокол № 12 від 26 12 2019 р.

Завідувач кафедри

Р.М. Пелешак  
 Ініціали та прізвище

Схвалено на засіданні науково-методичної ради навчально-наукового інституту фізики, математики, економіки та інноваційних технологій.

Протокол № 1 від 28 01 2020 р.

Схвалено на засіданні науково-методичної ради університету.

Протокол № 2 від 25 02 2020 р.

## 1. МЕТА ВИВЧЕННЯ НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ

**Мета:** сформувати в аспірантів знання про теоретичні підходи до опису процесів самоорганізації наноструктур.

**Предмет:** закономірності формування наноструктур, отриманих різними методами.

**Завдання:**

- формування в аспірантів розуміння процесів самоорганізації при отриманні наноструктур різними методами;
- засвоєння аспірантами знань та набуття навичок, необхідних для розробки математичних моделей, що описують синергетичні ефекти в наносистемах;
- вироблення в аспірантів умінь та навички застосовувати основні методи та підходи синергетики до опису процесів самоорганізації в нерівноважних нелінійних системах;
- формування умінь вірно висловлювати фізичні ідеї;
- вироблення навичок самостійної роботи.

У результаті вивчення дисципліни “Синергетичні принципи формування наноструктур” аспірант повинен оволодіти такими **компетентностями**:

*Загальні компетентності:*

- здатність до вільного, критичного мислення, розуміння у категоріально-концептуальному вимірі широкого кола світоглядних питань, вміння долати упередження некритичного мислення у їх осмисленні;
- вміння системно бачити і розуміти зміст філософсько-всезагальних та спеціально-предметних категорій, які застосовуються у власному науковому дослідженні;
- здатність проведення досліджень на високому рівні та генерування нових ідей;
- вміння працювати із наукометричними базами даних з метою виконання власного наукового дослідження та використовувати інтернет-технології для організації і забезпечення власної наукової, педагогічної та інноваційної діяльності, у підготовці наукових публікацій, звітів, ділової та особистої документації;
- здатність розв’язувати комплексні проблеми в галузі професійної діяльності, проводити оригінальне наукове дослідження та здійснювати дослідницько-інноваційну діяльність на основі глибокого переосмислення наявних та створення нових цілісних теоретичних або практичних знань та/або професійної практики;
- здатність до суб’єкт-об’єктної взаємодії, презентації наукових доробок та ідей, володіння науковим стилем викладу матеріалу дослідження;
- здатність до роботи в наукових групах, вміння мотивувати інших, готовність до участі у міжнародних наукових проектах;
- здатність до критичної оцінки сучасних наукових досліджень і генерування нових ідей при вирішенні дослідницьких і практичних завдань.

#### *Фахові компетентності:*

- здатність користуватися основними джерелами наукової інформації, у тому числі базами даних та науковими публікаціями;
- здатність здійснювати огляд і аналіз сучасних публікацій в періодичних виданнях за вибраною тематикою наукових досліджень з фізики та астрономії;
- здатність встановлювати зв'язок між експериментальними і теоретичними результатами, здійснювати феноменологічний та теоретичний опис досліджуваних явищ, об'єктів і процесів.
- здатність кількісно аналізувати, узагальнювати та осмислювати результати наукових досліджень за допомогою сучасних фізичних та астрономічних методів;
- здатність застосовувати математичні та числові методи для розв'язування фізичних та астрономічних задач і моделювання фізичних процесів та систем;
- володіння синергетичними принципами формування наноструктур та сучасними експериментальними методами дослідження напівпровідників та гетеросистем.

#### **Програмні результати навчання:**

- знання фізичних законів і відомих фактів для якісної та кількісної фізичної інтерпретації результатів експериментальних досліджень;
- знання закономірностей досліджуваних явищ і фізичних об'єктів у системі знань даної області фізики та астрономії, оцінки їхньої наукової новизни;
- знати механізми фізичних процесів, що протікають в напівпровідниках та нанорозмірних структурах;
- вміти отримати теоретичний чи експериментальний результат в обмежених часових рамках з наголосом на професійну сумлінність та відсутність плагіату;
- вміти пояснити залежність електрофізичних та оптичних характеристик від властивостей матеріалів, в тому числі і розмірних.

## **2. ПЕРЕДУМОВИ ДЛЯ ВИВЧЕННЯ НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ**

Дисципліна “Синергетичні принципи формування наноструктур” вивчається після таких дисциплін: “Фізика напружених низькорозмірних наногетеросистем”, “Оптичні властивості напівпровідників та діелектриків”.

## **3. ОЧІКУВАНІ РЕЗУЛЬТАТИ НАВЧАННЯ**

У результаті вивчення цієї навчальної дисципліни аспіранти повинні **знати:**

- основні поняття і терміни синергетики;
- методи моделювання процесів самоорганізації наносистем;

- основи теорії стійкості стаціонарних станів автономних динамічних систем;
- загальні закономірності утворення часових, просторових та просторово-часових структур у складних дисипативних системах;
- основні поняття, означення, принципи і закономірності формування самоорганізованих наноструктур;
- межі застосування відповідних математичних моделей, що описують процеси самоорганізації наносистем;

#### **вміти:**

- формулювати проблему, що розглядається;
- визначати мету і завдання дослідження;
- оцінювати межі використання ідеалізованих моделей при вивченні реальних фізичних систем;
- знаходити умови утворення макроскопічних часових, просторових або просторово-часових структур у складних системах, коли до системи неперервно підводяться потоки енергії та/або речовини;
- порівнювати отримані теоретичні результати з даними інших джерел;
- використовувати теоретичні знання для розв'язування задач та інтерпретації результатів експерименту.

## **4. КРИТЕРІЇ ОЦІНЮВАННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ НАВЧАННЯ**

Оцінювання здійснюється за шкалами оцінювання: ЄКТС, стобальною і національною.

**А (90 – 100 балів)** – *відмінні знання та уміння лише з незначною кількістю несуттєвих помилок*: отримує аспірант, який виявляє глибокі системні знання програмного матеріалу; вміє формулювати наукову проблему, робочі гіпотези досліджуваної проблеми; будує загальну методологічну базу власного наукового дослідження, усвідомлює його актуальність, мету і практичну цінність; вміє формулювати, експериментально підтверджувати, обґрунтовувати і застосовувати на практиці нові конкурентоздатні ідеї, методи, технології розв'язку прикладних задач; володіє високим рівнем узагальнення та систематизації програмного матеріалу; дає точне визначення і тлумачення основних понять, законів і теорій; вільно застосовує теоретичні знання для розв'язування прикладних задач та пропонує раціональний спосіб їх розв'язування; може встановити зв'язок з матеріалом інших тем даної дисципліни чи інших дисциплін; вільно володіє різними методами і способами моделювання самоорганізаційних процесів; правильно розв'язує задачі різної складності; виконав усі види навчальної роботи.

**В (82 – 89 балів)** – *вище середнього рівня з кількома помилками*: отримує аспірант, знання та уміння якого відповідають вимогам програми; який вільно володіє навчальним матеріалом щодо теоретичних підходів до опису процесів самоорганізації наноструктур; застосовує отримані знання на практиці, однак, допускає неточності й не завжди може застосувати знання для розв'язування

принципово нової для нього задачі; міцно засвоїв основні поняття, означення, принципи і закономірності формування самоорганізованих наноструктур; з незначними помилками будує математичні моделі, що описують процеси самоорганізації наносистем; володіє міцними знаннями щодо загальних закономірностей утворення часових, просторових та просторово-часових структур у складних дисипативних системах; обирає раціональний спосіб розв'язування задачі, але розв'язує її з незначними помилками; виконав усі види навчальної роботи.

**С (75 – 81 бал)** – *в цілому ґрунтовні системні знання з невеликою кількістю суттєвих помилок*: отримує аспірант, який виявив ґрунтовні й міцні знання програмного матеріалу щодо класифікації наногетеросистем та їх фізичних властивостей, основних моделей формування наносистем; володіє усіма необхідними вміннями й навичками застосування сучасних методів дослідження напівпровідників та гетеросистем; орієнтується в теоретико-методологічних засадах розв'язування задач синергетики, однак, допускає суттєві неточності; в цілому самостійно застосовує теоретичні знання на практиці; робить певні узагальнення; вільно розв'язує репродуктивні задачі; однак, при розв'язуванні пошукових та творчих задач зустрічається чимало неточностей або суттєва помилка; володіє усіма методами розв'язування прикладних задач, але робить помилки під час їх застосування; немає глибокого розуміння фізичного змісту використаних понять; уміє інтерпретувати отримані розв'язки задачі та робити висновки; виконав усі види навчальної роботи.

**Д (67 – 74 бали)** – *непогано, але зі значною кількістю недоліків*: отримує аспірант за знання і розуміння тільки основного програмного матеріалу; відтворює матеріал у спрощеній формі; може продемонструвати зв'язок між окремими теоретичними закономірностями та розв'язує нескладні репродуктивні задачі; вміє формулювати основні висновки та робити узагальнення, але допускає при цьому суттєві помилки і неточності; виявляє слабку обізнаність з міжпредметними зв'язками даної дисципліни; недостатньо орієнтується в теоретико-методологічних засадах розв'язування задач і не завжди може використати теоретичні знання на практиці; відчуває труднощі під час розв'язування прикладних задач; недостатньо володіє методами розв'язування задач та аналізу побудованої моделі задачі; з допомогою викладача здатен інтерпретувати, аналізувати та оцінювати отримані розв'язки задачі; виконав усі види навчальної роботи.

**Е (60 – 66 балів)** – *знання та вміння задовільняють мінімальним критеріям*: отримує аспірант, знання та вміння якого задовільняють мінімальним критеріям відповідно до програми; який може відтворити більше половини навчального матеріалу на репродуктивному рівні з елементами логічних зв'язків; володіє елементарними вміннями та навичками; може розв'язати просту репродуктивну задачу; погано орієнтується в питаннях закономірностей формування наноструктур, отриманих різними методами; допускає суттєві неточності; допускає грубу помилку, аналізуючи побудовану

модель наноструктури; з допомогою викладача здатен інтерпретувати отримані результати та робити висновки; виконав усі види семестрової навчальної роботи, але зі значними недоліками.

**FX (35 – 59 балів)** – незадовільні знання з можливістю повторного складання екзамену: отримує аспірант за поверхневе знання і розуміння основного програмного матеріалу; непослідовний виклад матеріалу з допущенням суттєвих помилок; який не вміє робити узагальнення та висновки; не вміє застосовувати теоретичні знання при розв’язуванні прикладних задач; необізнаний в питаннях, винесених на самостійне опрацювання; не орієнтується в теоретико-методологічних засадах розв’язування фізичних задач; не вміє застосовувати методи розв’язування задач на практиці; не володіє методами аналізу побудованої математичної моделі задачі; не виконав усіх видів навчальної роботи.

**F (0 – 34 бали)** – виставляється у випадку, коли аспірант володіє лише окремими поняттями, фрагментарними знаннями програмного матеріалу без жодного взаємозв’язку між ними; за відсутності сформованих умінь та навичок, що унеможлиблює побудову ним математичної моделі задачі, розв’язування прикладних задач; при цьому ж аспірант не виконав усіх видів навчальної роботи.

## 5. ЗАСОБИ ДІАГНОСТИКИ РЕЗУЛЬТАТІВ НАВЧАННЯ

- контрольні роботи;
- захист індивідуального навчально-дослідницького завдання

## 6. ПРОГРАМА НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ

### 1. Математичні основи опису процесів самоорганізації при формуванні наноструктур.

- 1.1. Вихідні рівняння. Фазові траєкторії. Стійкість. Нормальна форма рівнянь.
- 1.2. Система з одним ступенем вільності.
- 1.3. Відсутність дисипативних структур у системах з однією змінною, які описуються диференціальним рівнянням другого порядку.
- 1.4. Модель хімічної реакції “брюсселятор”.
- 1.5. Система з двома ступенями вільності.
- 1.6. Автоколивання.
- 1.7. Структурна стійкість. Біфуркація. Аналітичні розв’язки в околі точки біфуркації.
- 1.8. Ефект Бенара.
- 1.9. Швидкі та повільні рухи. Адіабатичне наближення.
- 1.10. Просторово-неоднорідні системи.

## **2. Формування просторово-неоднорідних структур та їх опис.**

- 2.1. Приклади систем нестабільних частинок, що мають фазові переходи.
- 2.2. Нестабільність однорідного розподілу частинок, що притягуються, генеруються з постійною швидкістю і мають скінченний час життя.
- 2.3. Одновимірна надгратка.
- 2.4. Стійкість надграток.
- 2.5. Утворення просторово-неоднорідних структур густини антиструктурних дефектів.
- 2.6. Експериментальні спостереження періодичних структур при ядерному опромінюванні.

## **3. Початкова стадія (нуклеація) формування наноструктур під впливом лазерного опромінення.**

- 3.1. Нуклеація нанометрової періодичної структури при дії поверхневої статичної акустичної хвилі.
- 3.2. Інкремент дефектно-деформаційної нестійкості.
- 3.3. Залежність інкремента дефектно-деформаційної нестійкості від модуля хвильового вектора.
- 3.4. Вплив температури та концентрації адатомів на період поверхневої надгратки.

## **4. Самоорганізація дефектно-деформаційних структур на поверхні твердих тіл під впливом імпульсного лазерного опромінення.**

- 4.1. Система нелінійних диференціальних рівнянь для деформації та концентрації дефектів.
- 4.2. Ієрархія формування дефектно-деформаційних структур.
- 4.3. Нелінійна динаміка самоорганізації гексагональної дефектно-деформаційної структури на поверхні ізотропного твердого тіла.
- 4.4. Утворення ансамблю наночастинок адатомів з бімодальним розподілом за розмірами.
- 4.5. Селекція дефектно-деформаційних надграток, яка індукована зовнішньою механічною напругою та керована зміна симетрії ансамблю наночастинок.

## **5. Формування самоорганізованих наноструктур в імплантованих напівпровідниках.**

- 5.1. Модуляція поверхні йонним розпиленням.
- 5.2. Формування самоорганізованих наноструктур Si-Ge шляхом впровадження йонів германію у кремній.
- 5.3. Йонний синтез нанокристалів  $A^3B^5$  в кремнії.
- 5.4. Теоретичні підходи до розуміння процесів самоорганізації в імплантованих напівпровідниках.

## **6. Вплив зовнішніх полів на процеси самоорганізації наносистем.**

- 6.1. Вплив статичної деформації на нуклеацію нанометрової поверхневої надгратки адсорбованих атомів.

- 6.2. Вплив періодичної деформації (ультразвуку) на формування однорідних самоорганізованих нанокластерів.
- 6.3. Вплив електричного поля на умови самоорганізації наноструктур.
- 6.4. Керування геометричними розмірами та формою нанокластерів під дією зовнішніх полів.

## **7. Спонтанне формування впорядкованих наноструктур в гетероепітаксійних системах.**

- 7.1. Етапи формування квантових точок та їх математичний опис.
- 7.2. Концентраційні пружні домени в твердих розчинах напівпровідників.
- 7.3. Періодичні фасетовані поверхні. Гетероепітаксійні структури на періодичних фасетованих поверхнях.
- 7.4. Поверхневі структури плоских пружних доменів.
- 7.5. Упорядковані масиви трьохмірних когерентно-напружених острівців.
- 7.6. Самоорганізація масивів вертикально зв'язаних квантових точок.
- 7.7. Вплив ізовалентного легування на самоорганізацію однорідних за розмірами квантових точок.

### **Тематика практичних занять**

- 1. Лінійна математична модель нуклеації нанометрової періодичної поверхневої структури під впливом лазерного опромінення.
- 2. Нелінійна модель формування самоорганізованих дефектно-деформаційних структур під впливом лазерного опромінення.
- 3. Вплив ізовалентного легування на формування однорідних за розмірами та формою квантових точок.
- 4. Дифузійно-деформаційна теорія формування самоорганізованих нанокластерів в імплантованій напівпровідниковій матриці.
- 5. Формування періодичної нанометрової структури адсорбованих атомів під дією електричного поля.
- 6. Роль акусто-електронної взаємодії в формуванні поверхневої надгратки адсорбованих атомів.
- 7. Вплив періодичної деформації на формування однорідних самоорганізованих нанокластерів у напівпровідниковій матриці.
- 8. Самоорганізація масивів вертикально зв'язаних квантових точок.

## **7. ІНДИВІДУАЛЬНІ ЗАВДАННЯ**

Індивідуальні завдання (ІЗ) – це частина навчального матеріалу з дисципліни, що має на меті поглибити, узагальнити та закріпити знання, отримані аспірантами у процесі навчання, а також застосування цих знань на практиці.

Звіт про виконання ІЗ повинен містити титульну сторінку (згідно зразка) та змістове наповнення до 10 аркушів. Звіт про виконання ІЗ – це завершена робота теоретичного характеру, яка містить систематизований чітко



викладений матеріал за обраною темою на основі спеціально підібраної літератури. ІЗ подається викладачу не пізніше, ніж за два тижні до екзамену.

Критерії оцінювання індивідуального завдання: повнота розкриття теми у роботі – 16 балів, якість мовного оформлення – 2 бали, якість бібліографічного опису – 2 бали.

Теми індивідуальних завдань:

1. Вплив електрон-деформаційної взаємодії на умови формування дефектно-деформаційних структур.
2. Вплив одновісного тиску на умови формування нанокластерів.
3. Особливості самоорганізації наноструктур у напівпровідниковому германії.
4. Формування наноконусів під впливом імпульсного лазерного опромінення.
5. Математична модель формування бар'єрних структур під впливом імпульсного лазерного опромінення.
6. Математична модель просторового перерозподілу електричного заряду у гетеросистемах з квантовою ямою під впливом лазерного опромінення.
7. Математична модель просторового перерозподілу електричного заряду у гетеросистемах з квантовими точками.
8. Синергетичні принципи формування нанопор під впливом ультразвуку.
9. Структури з періодичною модуляцією складу в епітаксійних плівках твердих розчинів напівпровідників.
10. Перебудова зонної структури напівпровідників під впливом імпульсного лазерного опромінення.
11. Математичні моделі самоорганізації квантових точок, отриманих методом молекулярно-променевої епітаксії.
12. Температурні режими формування самоорганізованих наноструктур.
13. Математичні моделі формування 1D-наноструктур (квантових дріотів).
14. Спонтанне формування тунельно-резонансних структур під впливом лазерного опромінення.

## **8. ЗАВДАННЯ ДЛЯ САМОСТІЙНОЇ РОБОТИ**

Самостійна робота аспіранта з дисципліни передбачає опрацювання теоретичного матеріалу, виконання завдань у межах кожної теми робочої програми, підготовку до контрольних робіт та захисту індивідуального навчально-дослідницького завдання.

Перелік завдань для самостійної роботи аспірантів:

1. Вивести систему рівнянь для деформації та дифузії дефектів, яка описує процеси самоорганізації дефектно-деформаційних структур.

2. Проаналізувати залежність інкремента дефектно-деформаційної нестійкості від хвильового числа при різних параметрах (концентрація адатомів, температура, пружні сталі, коефіцієнт дифузії).
3. Отримати аналітичні розв'язки в околі точки біфуркації при формуванні наноструктур дефектів під впливом лазерного опромінення.
4. Розробити математичну модель стаціонарного одномодового режиму формування надгратки адсорбованих атомів.
5. Зробити підбір експериментальних досліджень, які описані в науковій літературі, результати яких добре узгоджуються з існуючими математичними моделями формування наноструктур під впливом імпульсного лазерного опромінення.
6. Зробити підбір сучасної наукової літератури та здійснити її аналіз з проблем самоорганізації масивів вертикально зв'язаних квантових точок.

## 9. ФОРМИ ПОТОЧНОГО ТА ПІДСУМКОВОГО КОНТРОЛЮ

Засвоєння аспірантами матеріалу з дисципліни перевіряється контрольними роботами та виконанням індивідуального завдання. Також аспіранти повинні бути готовими до експрес-контролю на практичних заняттях (фронтальне опитування, співбесіда, письмовий тест). Поточний контроль знань здійснюється з метою перевірки рівня підготовленості аспіранта до практичного заняття та рівня засвоєння ним навчального матеріалу. Вивчення дисципліни завершується заліком.

Сумарна кількість балів з дисципліни визначається як сума балів з усіх видів навчальної роботи і виставляється за трьома шкалами оцінювання: стобальною, національною і ЄКТС.

Залік за талонами № 2 і К проводиться в письмовій формі з оцінюванням за стобальною шкалою. Завдання охоплюють весь програмний матеріал даної навчальної дисципліни.

Контрольні роботи, окрім тестових завдань, обов'язково передбачають теоретичні дослідження та вміння аспіранта застосовувати теоретичні знання для розв'язування прикладних задач. У контрольній роботі зазначається кількість балів за правильне виконання кожного з її завдань з урахуванням їх складності, обсягу та значущості в засвоєнні дисципліни.

Розподіл 100 балів між видами робіт:

Поточний контроль та самостійна робота				Сума
Контрольні роботи (КР)			Індивідуальне завдання	
Тема 1-2	Тема 3-4	Тема 5-7		

КР 1	КР 2	КР 3	ІЗ	
20	30	30	20	100

## **10. ІНСТРУМЕНТИ, ОБЛАДНАННЯ, ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ**

Для захисту індивідуальних завдань аспірантам необхідна програма підготовки презентацій Microsoft PowerPoint, мультимедійний проектор.

## 11. РЕКОМЕНДОВАНІ ДЖЕРЕЛА ІНФОРМАЦІЇ

### Рекомендована література

#### Основна

1. Заячук Д.М. Нанотехнології і наноструктури / Д.М. Заячук. – Л. : Львівська політехніка, 2009. – 580 с.
2. Леденцов Н.Н. Гетероструктуры с квантовыми точками: получение, свойства, лазеры / Н.Н. Леденцов, В.М. Устинов, В.А. Шукин, П.С. Копьев // Физика и техника полупроводников. – 1998. – Т. 32. – № 4. – С. 385 – 410.
3. Назаров О.М. Наноструктури і нанотехнології / О.М. Назаров, М.М. Нищенко. – Київ : НАУ, 2012. – 248 с.
4. Пелещак Р.М. Роль електрон-деформаційної взаємодії в формуванні нанокластерів при лазерному опроміненні GaAs, CdTe : монографія / Роман Пелещак, Олег Кузик, Олеся Даньків. – Дрогобич : Редакційно-видавничий відділ Дрогобицького державного педагогічного університету імені І. Франка, 2019. – 210 с.
5. Пелещак Р.М. Математичне моделювання фізичних процесів. Матеріали до самостійної роботи / Роман Пелещак, Олег Кузик, Олеся Даньків. – Дрогобич : Видавничий відділ Дрогобицького державного педагогічного університету імені Івана Франка, 2015. – 98 с.
6. Погосов В.В. Нанофізика і нанотехнології / В.В. Погосов, Ю.А. Куницький, А.В. Бабіч, А.В. Коротун, А.П. Шпак. – Запоріжжя : ЗНТУ, 2011. – 381 с.
7. Поплавко Ю.М. Нанофізика, наноматеріали, наноелектроніка : навчальний посібник / Ю.М. Поплавко, О.В. Борисов, Ю.І. Якименко. – К. : НТУУ “КПІ”, 2012. – 300 с.
8. Emel'yanov V.I. A Hierarchy of the formation of nanometer clusters and periodic structures of laser-induced defects / V.I. Emel'yanov, I.M. Panin // Laser Physics – 1996. – V. 6. – P. 971 – 978.
9. Peleshchak R.M. Role of acoustoelectric interaction in the formation of nanoscale periodic structures of adsorbed atoms / R.M. Peleshchak, I.I. Lazurchak, O.V. Kuzyk, O.O. Dan'kiv, G.G. Zegrya // Semiconductors. – 2016. – V. 50. – № 3. – P. 314 – 319.
10. Peleshchak R.M. Temperature regimes of formation of nanometer periodic structure of adsorbed atoms in GaAs semiconductors under the action of laser irradiation / R.M. Peleshchak, O.V. Kuzyk, O.O. Dan'kiv // Condensed Matter Physics. – 2015. – V. 18. – № 4. – P. 43801: 1 – 8.
11. Peleshchak R.M. The Conditions of Formation of the Uniform-Sized Quantum Dots in the Field of an Ultrasonic Wave / R.M. Peleshchak, O.V. Kuzyk, O.O. Dan'kiv // Journal of Nano Research. – 2019. – V. 57. – P. 40 – 50.

#### Допоміжна

12. Arakelian S. Laser-induced semiconductor nanocluster structures on the solid surface: new physical principles to construct the hybrid elements for photonics

- / S. Arakelian, V. Emel'yanov, S. Kutrovskaya // Opt. Quant. Electron. – 2016. – V. 48. – № 6. – P. 342 – 575.
13. Заячук Д.М. Нанорозмірні структури і надгратки / Д.М. Заячук. – Л. : Львівська політехніка, 2006. – 220 с.
  14. Medvid A. Formation mechanisms of nano and microcones by laser radiation on surfaces of Si, Ge, and SiGe crystals / A. Medvid, P. Onufrijevs, R. Jarimaviciute-Gudaitiene, E. Dauksta, I. Prosycevas // Nanoscale Research Letters. – 2013. – V. 8. – № 1. – P. 264 – 271.
  15. Moskal D.S. Periodic subsurface structures in GaAs formed by spatially modulated nanosecond pulse laser irradiation / D.S. Moskal, L.L. Fedorenko, M.M. Yusupov, M.M. Golodenko // Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics. – 2007. – V. 10. – № 3. – P. 80 – 83.
  16. Peleshchak R.M. Effect of Bi isovalent dopants on the formation of homogeneous coherently strained InAs quantum dots in GaAs matrices / R.M. Peleshchak, S.K. Guba, O.V. Kuzyk, I.V. Kurilo, O.O. Dan'kiv // Semiconductors. – 2013. – V. 47. – № 3. – P. 349 – 353.
  17. Peleshchak R.M. Formation of periodic structures under the influence of an acoustic wave in semiconductors with a two-component defect subsystem / R.M. Peleshchak, O.V. Kuzyk, O.O. Dan'kiv // Ukrainian Journal of Physics. – 2016. – V. 61. – № 8. – P. 741 – 746.
  18. Peleshchak R.M. The influence of the electric field on the nucleation of the nanometer periodic structure of adatoms in GaAs semiconductor under the action of laser irradiation / R.M. Peleshchak, O.V. Kuzyk, O.O. Dan'kiv, S.K. Guba // Condensed Matter Physics. – 2019. – V. 22. – № 1. – P. 13801: 1 – 9.
  19. Peleshchak R.M. Spatial Redistribution of Interstitial Atoms and Vacancies in Semiconductors under the Influence of Pulsed Laser Irradiation / R.M. Peleshchak, O.V. Kuzyk, O.O. Dan'kiv // Journal of nano- and electronic physics. – 2019. – V. 11. – № 3. – P. 03018 (6 p.).
  20. Shchukin V.A. Spontaneous Ordering of Arrays of Coherent Strained Islands / V.A. Shchukin, N.N. Ledentsov, P.S. Kop'ev and D. Bimberg // Phys. Rev. Let. – 1995. – V. 75. – № 16. – P. 2968 – 2971.

### **Інформаційні ресурси**

1. Електронний архів наукових та освітніх матеріалів КПІ ім. Ігоря Сікорського: <http://ela.kpi.ua/>
2. Науковий репозитарій Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича: <http://www.library.chnu.edu.ua/index.php?page=/ua/04fondy>
3. Електронний науковий архів Науково-технічної бібліотеки Національного університету “Львівська політехніка”: <http://ena.lp.edu.ua:8080/>
4. Мультидисциплінарний відкритий електронний архів ELibUkr-OA: <http://oa.elibukr.org/>