

**КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ ТАРАСА ШЕВЧЕНКА**

Фізичний факультет
(назва факультету)

Кафедра загальної фізики

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Заступник декана
з навчальної роботи
Момот О.В.

« ____ » _____ 2020 року

РОБОЧА ПРОГРАМА НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ¹

Фізичні властивості наносистем

(повна назва навчальної дисципліни)

для студентів

галузь знань 10 Природничі науки
(шифр і назва)

спеціальність 104 Фізика та астрономія
(шифр і назва спеціальності)

освітній рівень магістр
(молодший бакалавр, бакалавр, магістр)

освітня програма Фізика наносистем
(назва освітньої програми)

вид дисципліни обов'язкова

Форма навчання	<u>очна</u>
Навчальний рік	<u>2020/2021</u>
Семестр	<u>2</u>
Мова викладання, навчання та оцінювання	<u>українська</u>
Форма заключного контролю	<u>екзамен</u>

Викладачі: доцент Цареградська Тетяна Леонідівна

(Науково-педагогічні працівники, які забезпечують викладання даної дисципліни у відповідному навчальному році)

Пролонговано: на 20 __/20 __ н.р. _____ (_____) «__» __ 20 __р.
(підпис, ПІБ, дата)

на 20 __/20 __ н.р. _____ (_____) «__» __ 20 __р.
(підпис, ПІБ, дата)

на 20 __/20 __ н.р. _____ (_____) «__» __ 20 __р.
(підпис, ПІБ, дата)

КИЇВ – 2020

¹ Робоча програма навчальної дисципліни є нормативним документом вищого навчального закладу і містить виклад конкретного змісту навчальної дисципліни, послідовність, організаційні форми її вивчення та їх обсяг, визначає форми та засоби поточного і підсумкового контролю.

Розробники²: Коротченко Олег Олександрович, доктор фіз.-мат. наук, професор,
професор кафедри загальної фізики
Цареградська Тетяна Леонідівна, кандидат фіз.-мат. наук, доцент,
доцент кафедри загальної фізики
(вказати авторів: ПІБ, науковий ступінь, вчене звання, посада, кафедра)

ЗАТВЕРДЖЕНО

Зав. кафедри _____

(підпис)

(Боровий М.О.)
(прізвище та ініціали)

Протокол № 12 від 21 травня 2020 р.

Схвалено науково-методичною комісією фізичного факультету

протокол №33 від 11 червня 2020 року

Голова науково-методичної комісії _____
(підпис)

(Оліх О.Я.)
(прізвище та ініціали)

« _____ » _____ 2020 року

² Розробляється лектором. Робоча програма навчальної дисципліни розглядається на засіданні кафедри (циклової комісії – для коледжів), науково-методичної комісії факультету/інституту (радї навчального закладу - коледжу), підписується завідувачем кафедри (головою циклової комісії), головою науково-методичної комісії факультету/інституту (головою ради) і затверджується заступником декана/директора інституту з навчальної роботи (заступником директора коледжу).

ВСТУП

1. Мета дисципліни – отримання глибоких та систематизованих знань фізичних властивостей напівпровідникових нанорозмірних систем, а також наноматеріалів, отриманих при загартуванні з розплаву та керованим наноструктуруванням з аморфного стану.

2. Попередні вимоги до опанування або вибору навчальної дисципліни:

1. Знати

основні питання фізики низькорозмірних напівпровідників, зокрема: математичне формулювання та фізичний зміст основних проявів квантово-розмірного ефекту у низькорозмірних напівпровідниках; основні сучасні уявлення фізики напівпровідникових гетероструктур, їх застосування у приладах і пристроях;

закони термодинаміки, метод термодинамічних потенціалів Гіббса, загальні умови термодинамічної рівноваги, умови рівноваги в гомогенних та гетерогенних системах, парціальні та інтегральні термодинамічні функції, термодинамічні функції ідеальних та реальних розчинів, квазіхімічну теорію розчинів.

2. Вміти

застосовувати на практиці методи квантової механіки та фізики твердого тіла для опису властивостей низькорозмірних напівпровідників; логічно і послідовно формулювати основні закономірності визначення енергетичних станів у низькорозмірних напівпровідниках; самостійно працювати з науковою літературою в галузі фізики напівпровідникових наносистем;

застосовувати на практиці метод термодинамічних потенціалів Гіббса, аналізувати основні типи діаграм стану бінарних систем за допомогою ізобаро-ізотермічного потенціалу, розраховувати криві рівноваги та будувати діаграми стану.

3. Володіти

основними навичками розв'язку типових задач квантової механіки та фізики твердого тіла, методами розрахунку енергетичного спектру носіїв заряду у нанорозмірному середовищі та розрахунків з використанням кінетичного рівняння Больцмана в наближенні часу релаксації;

елементарними навичками графічно визначати парціальні та відносні парціальні термодинамічні функції за відомими інтегральними для бінарних систем, розраховувати парціальні та відносні парціальні функції для одного з компонентів за відомими парціальними функціями другого компонента.

3. Анотація навчальної дисципліни / референс:

В рамках курсу «Фізичні властивості наносистем» розглядаються як класичні, так і сучасні досягнення в області опису фізичних закономірностей та практичного використання напівпровідникових нанорозмірних систем та властивостей наноматеріалів, отриманих гартуванням з розплаву та керованим наноструктуруванням з аморфного стану.

Метою вивчення дисципліни є засвоєння основних положень теорії напівпровідникових наносистем, зокрема, статистику носіїв заряду в таких системах, основних механізмів переносу заряду в них та теорії високотемпературної стабільності аморфних сплавів, явища фазового розшарування в аморфних сплавах, методів та властивостей наноматеріалів, отриманих гартуванням з розплаву та керованим наноструктуруванням з аморфного стану, а також теорії високотемпературної стабільності аморфних сплавів.

Навчальна задача курсу полягає в оволодінні методами розрахунку та експериментальних вимірювань напівпровідникових наносистем, включаючи квантові ями, дрти, точки та

композитні матеріали із напівпровідниковою складовою та фізичних властивостей наноматеріалів, отриманих гартуванням з розплаву і керованим наноструктуруванням з аморфного стану.

Результати навчання полягають в умінні застосовувати закони зарядопереносу у напівпровідникових наносистемах та термодинамічної теорії високотемпературної стабільності аморфних сплавів для розв'язання практичних задач фізики наносистем.

Методи викладання: лекції, консультації, лабораторні роботи.

Методи оцінювання: опитування в процесі лекції, контрольні роботи після основних розділів курсу, оцінювання лабораторних робіт, іспит.

Підсумкова оцінка виставляється на основі проміжних оцінок (60%) та іспиту (40%).

4. Завдання (навчальні цілі) – ознайомлення студентів з фізичними властивостями основних типів напівпровідникових наносистем та наноматеріалів, отриманих гартуванням з розплаву та керованим наноструктуруванням з аморфного стану.

Згідно вимог проекту Стандарту вищої освіти України (другий (магістрський) рівень вищої освіти, галузь знань 10 «Фізика», спеціальність 104 «Фізика та астрономія», ОНП «Фізика наносистем» дисципліна забезпечує набуття здобувачами освіти наступних **компетентностей**:

Інтегральних:

Здатність розв'язувати складні задачі і проблеми дослідницького та інноваційного характеру у фізиці та астрономії.

Загальних:

- ЗК01. Здатність застосовувати знання у практичних ситуаціях
- ЗК02. Знання та розуміння предметної області та розуміння професійної діяльності
- ЗК03. Здатність до пошуку, оброблення та аналізу інформації з різних джерел
- ЗК04. Здатність вчитися і оволодівати сучасними знаннями

Фахових:

- СК01. Здатність використовувати закони та принципи фізики у поєднанні із потрібними математичними інструментами для опису природних явищ.
- СК05. Здатність сприймати новоздобуті знання в області фізики та астрономії та інтегрувати їх із уже наявними, а також самостійно опановувати знання і навички, необхідні для розв'язання складних задач і проблем у нових для себе деталізованих предметних областях фізики та астрономії й дотичних до них міждисциплінарних областях.
- СК10. Здатність застосовувати сучасні експериментальні методи дослідження та діагностики наносистем.
- СК12. Здатність застосовувати теорії опису фізичних властивостей наносистем різних типів

5. Результати навчання за дисципліною: (описуються з детальною достовірністю для розробки заходів оцінювання)

Результат навчання (1. знати; 2. вміти; 3. комунікація*; 4. автономність та відповідальність*)		Методи викладання і навчання	Методи оцінювання	Відсоток у підсумковій оцінці з дисципліни
Код	Результат навчання			

* заповнюється за необхідністю, наприклад для практик, лабораторних курсів тощо.

1.1	Знання теорії напівпровідникових наносистем, особливостей розрахунку густини станів та концентрації носіїв заряду в низкорозмірному випадку, основних механізмів переносу заряду в квантових ямах, дротах, точках та композитних матеріалах із напівпровідниковою складовою.	лекції	Модульна контрольна робота	20
1.2	Знання теорії високотемпературної стабільності аморфних сплавів; закономірності явища фазового розшарування в аморфних сплавах, властивості наноматеріалів, отриманих гартуванням з розплаву та керованим наноструктуруванням з аморфного стану (контрольованим відпалом та мегапластичною деформацією).	лекції	Модульна контрольна робота	20
2.1	Вміння досліджувати напівпровідникові наносистеми, логічно і послідовно формулювати основні закономірності кінетичних явищ в них.	Лабораторні роботи	Захист лабораторних робіт	10
2.2	Вміння досліджувати фізичні властивості наноматеріалів, отриманих гартуванням з розплаву та керованим наноструктуруванням з аморфного стану.	Лабораторні роботи	Захист лабораторних робіт	10

6. Співвідношення результатів навчання дисципліни із програмними результатами навчання (необов'язково для вибіркових дисциплін)

Програмні результати навчання	Результати навчання дисципліни			
	1.1	1.2	2.1	2.2
РН01. Використовувати концептуальні та спеціалізовані знання і розуміння актуальних проблем і досягнень обраних напрямів сучасної теоретичної і експериментальної фізики для розв'язання складних задач і практичних проблем.	+	+	+	+
РН05. Здійснювати феноменологічний та теоретичний опис досліджуваних фізичних явищ, об'єктів і процесів.	+		+	
РН11. Застосовувати теорії, принципи і методи фізики для розв'язання складних міждисциплінарних наукових і прикладних задач.	+		+	
РН18. Знати методи отримання, особливості структури та властивостей аморфно-нанокристалічних сплавів.				+
РН25. Знати методи отримання та особливості структури наносистем, а також вміти встановлювати причинно-наслідковий зв'язок між особливостями їхнього складу та властивостей.		+		

7. Структура курсу

Курс складається з 2-х змістових модулів: «Фізичні властивості напівпровідникових гетеропереходів», який включає в себе 8 лекцій та 3-х лабораторних роботи та «Властивості

наноматеріалів, отриманих загартуванням з розплаву та керованим наноструктуруванням з аморфного стану», який складається з 7 лекцій та 3-х лабораторних робіт.

8. Схема формування оцінки:

8.1 Форми оцінювання студентів: (зазначається перелік видів робіт та форм їх контролю / оцінювання із зазначенням Min. – рубіжної та Max. кількості балів чи відсотків)

- семестрове оцінювання:

1. Модульна контрольна робота 1 (12 балів-20 балів). Захист лабораторних робіт(6 балів-10 балів).
2. Модульна контрольна робота 2 (12 балів-20 балів). Захист лабораторних робіт(6 балів-10 балів).

- підсумкове оцінювання у формі екзамену

Підсумкове оцінювання у формі екзамену³: (обов'язкове проведення екзаменаційного оцінювання в письмовій формі)

	ЗМ1/Частина 1 (за наявності)	ЗМ2/Частина 2 (за наявності)	екзамен	Підсумкова оцінка
Мінімум	<u>18</u>	<u>18</u>	<u>24</u>	<u>60</u>
Максимум	<u>30</u>	<u>30</u>	<u>40</u>	<u>100</u>

у випадку комплексного екзамену слід вказати питому вагу складових

Студент не допускається до екзамену, якщо під час семестру набрав менше 36 балів.⁴

(слід чітко прописати умови, які висувуються викладачами даної дисципліни).

Оцінка за іспит не може бути меншою **24 балів** для отримання загальної позитивної оцінки за курс.

8.2 Організація оцінювання: (обов'язково зазначається порядок організації передбачених робочою навчальною програмою форм оцінювання із зазначенням, у тому числі, результатів навчання, опанування яких перевіряється конкретним оцінюванням).

Шкала відповідності

Відмінно / Excellent	90-100
Добре / Good	75-89
Задовільно / Satisfactory	60-74
Незадовільно з можливістю повторного складання / Fail	35-59
Незадовільно з обов'язковим повторним вивченням дисципліни / Fail	0-34
Зараховано / Passed	60-100
Не зараховано / Fail	0-59

³ Семестрову кількість балів формують бали, отримані студентом у процесі теоретичного засвоєння матеріалу з усіх розділів дисципліни, семінарських занять, виконання практичних, лабораторних, індивідуальних, підсумкових контрольних робіт, творчих робіт впродовж семестру, передбачених робочою навчальною програмою (**100 балів** - для залікових дисциплін, у випадку, якщо дисципліна завершується екзаменом, то розподіл здійснюється за таким алгоритмом: **60 балів (60%) – семестровий контроль і 40 балів (40%) – екзамен**).

⁴ У випадку, коли дисципліна завершується екзаменом не менше – **20 балів**, а рекомендований мінімум **не менше 36 балів**, оскільки якщо студент на екзамені набрав менше **24 балів** (а це 60% від 40 балів, відведених на екзамен), то вони **не додаються** до семестрової оцінки незалежно від кількості балів, отриманих під час семестру, а в екзаменаційній відомості у графі «результуюча оцінка» переноситься лише кількість балів, отриманих під час семестру.

СТРУКТУРА НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ
ТЕМАТИЧНИЙ ПЛАН ЛЕКЦІЙ І ЛАБОРАТОРНИХ ЗАНЯТЬ

№ п/п	Назва теми	Кількість годин		
		лекції	лабораторні	Самостійна робота
Частина 1. Фізичні властивості напівпровідникових гетеропереходів				
1	Тема 1. Вступ. Розмірне квантування та квантово-розмірні структури с.р.с. Вивчення матеріалу лекції. Розмірне квантування та умови спостереження квантово-розмірного ефекту. Класифікація гетероструктур.	2		8
2	Тема 2. Властивості гетеро переходів. с.р.с. Вивчення матеріалу лекції. Підготовка до виконання лабораторної роботи. Ізольований гетероперехід. Граничні умови на гетеропереході. Побудова зонної діаграми поблизу гетеропереходу. Розрахунок вигину зон поблизу гетеропереходу.	2		8
3	Тема 3. Густина станів Лабораторна робота 1 Вступ до лабораторних робіт. Енергетичні стани електронів і дірок поблизу гетеропереходу. с.р.с. Вивчення матеріалу лекції. Густина станів в об'ємних напівпровідниках (випадок 3D системи). Густина станів в низкорозмірному випадку (2D, 1D, 0D наносистеми).	2	4	8
4	Тема 4. Ефективна густина станів. с.р.с. Вивчення матеріалу лекції. Підготовка до виконання лабораторної роботи. Поняття ефективної густини станів. Обчислення ефективної густини станів у випадку 3D системи та в низкорозмірному випадку (2D, 1D, 0D наносистеми).	2		8
5	Тема 5. Концентрація носіїв заряду у напівпровідникових наносистемах. Лабораторна робота 2. Дослідження вигину зон поблизу гетеропереходу методом фотое.р.с. с.р.с. Вивчення матеріалу лекції. Обробка експериментальних результатів, отриманих при виконанні лабораторної роботи. Обчислення концентрації вільних носіїв заряду у випадку 3D системи та в низкорозмірному випадку (2D, 1D, 0D наносистеми).	2	6	8
6	Тема 6. Розсіювання носіїв заряду на границях поділу у наносистемах із гетеропереходами. с.р.с. Вивчення матеріалу лекції. Підготовка до виконання лабораторної роботи. Обчислення ймовірності розсіювання носіїв заряду на прямокутній сходинці та на потенціальному бар'єрі.	2		8
7	Тема 7. Інтерференційні ефекти при надбар'єрному проходженні носіїв заряду. Лабораторна робота 3. Дослідження теплопровідності нанокompозитних матеріалів. с.р.с. Вивчення матеріалу лекції. Обробка експериментальних результатів, отриманих при виконанні лабораторної роботи. Обчислення ймовірності розсіювання при надбар'єрному проходженні електронів.	2	4	8
8	Тема 8. Тунельний транспорт носіїв заряду. с.р.с. Вивчення матеріалу лекції. Підготовка до підсумкової модульної контрольної	2		8

	роботи. Формула Ландауера. T- та S-матриці. Формалізм Ландауера-Буттікера. Мезоскопічні структури та квантовий хаос.			
	Контрольна робота 1 Захист лабораторних робіт		2 2	
Частина 2. Властивості наноматеріалів, отриманих загартуванням з розплаву та керованим наноструктуруванням з аморфного стану				
9	Тема 9. Структурні моделі аморфного стану. Класифікація нанокристалів, що утворюються при загартуванні з розплаву. с.р.с. Вивчення матеріалу лекції. Підготовка до виконання лабораторної роботи. Квазірідкі моделі, псевдокристалічні моделі. Нанокристали та нанокластери	2		8
10	Тема 10. Термодинамічна теорія високотемпературної стабільності аморфних сплавів. Модель вморожених центрів кристалізації. с.р.с. Вивчення матеріалу лекції. Розрахунок тиску в аморфній і кристалічній фазах. Розрахунок умов термодинамічно рівноважного стану для «вморожених» центрів кристалізації.	2		8
11	Тема 11. Зародкоутворення та спінодальний розпад. Фазове розшарування в рідких бінарних системах Лабораторна робота 4. Побудова концентраційних залежностей інтегральних відносних вільних енергій Гіббса початкової аморфної α -фази, аморфних фаз, що виникають при фазовому розшаруванні та кристалічних фаз для системи Ni-Zr. Розрахунок об'ємних часток аморфних та кристалічних фаз $X(T)$, що виникають в процесі неперервного ізотермічного відпалу аморфного сплаву Ni ₆₄ Zr ₃₆ . с.р.с. Вивчення матеріалу лекції. Підготовка до виконання лабораторної роботи. Термодинамічні рівняння, що описують процес фазового розшарування в рідких бінарних системах. Критерій розшарування рідкого бінарного сплаву.	2	4	8
12	Тема 12. Феноменологічна теорія спінодального розпаду. Висхідна дифузія. Рівняння ізотермічної дифузії для бінарної конденсованої системи с.р.с. Вивчення матеріалу лекції. Підготовка до виконання лабораторної роботи.	2		8
13	Тема 13. Явище фазового розшарування в аморфних бінарних системах. Теоретичний аналіз фазових перетворень в аморфних бінарних системах з розшаруванням. Лабораторна робота 5. Побудова концентраційних залежностей інтегральних відносних вільних енергій Гіббса початкової аморфної α -фази, аморфних фаз, що виникають при фазовому розшаруванні та кристалічних фаз для системи Fe-Zr. Розрахунок об'ємних часток аморфних та кристалічних фаз $X(T)$, що виникають в процесі неперервного ізотермічного відпалу аморфного сплаву Fe ₉₀ Zr ₁₀ . с.р.с. Вивчення матеріалу лекції. Термодинамічна передумова розшарування в аморфних	2	4	8

	сплавах. Аналіз результатів експериментальних досліджень явища фазового розшарування в аморфних сплавах.			
14	Тема 14. Аморфно-нанокристалічні сплави, їх властивості. Критерій переходу від аморфного стану до нанокристалічного. Лабораторна робота 6. Отримання аморфно-наноструктурного стану при низькотемпературному ізотермічному відпалі аморфного сплаву. Розрахунок частки кристалічної фази в отриманому матеріалі. с.р.с. Вивчення матеріалу лекції. Підготовка до виконання лабораторної роботи.	2	4	8
15	Тема 15. Методи керованого наноструктурування з аморфного стану. Фізичні властивості наноматеріалів, отриманих гартуванням з розплаву та керованим наноструктуруванням з аморфного стану. с.р.с. Вивчення матеріалу лекції. Підготовка до підсумкової модульної контрольної роботи. Підготовка до захисту лабораторних робіт.	2		8
	Підсумкова модульна контрольна робота Захист лабораторних робіт		2 2	
	ВСЬОГО	30	30	120

Примітка: слід зазначити теми, винесені на самостійне вивчення

Загальний обсяг 180 год.⁵, в тому числі:

Лекцій – **30 год.**

Семінари – 0 год.

Практичні заняття – 0 год.

Лабораторні заняття – 30 год.

Тренінги – 0 год.

Консультації – 0 год.

Самостійна робота – **120 год.**

Питання для самостійної роботи

1 модуль

1. Аналіз процесів розсіювання із врахуванням екранування носіїв заряду.
2. Розсіювання носіїв заряду на границях поділу.
3. Розсіювання на об'ємних модах та розмірно-обмежених поздовжніх оптичних фонах в квантових дротах.
4. Фреліховський потенціал в квантових ямах.
5. Особливості протікання струму в напівпровідникових наносистемах.
6. Релаксація концентрації нерівноважних носіїв заряду в напівпровіднику в просторово неоднорідному випадку.

2 модуль

1. Класифікація нанокристалів, що утворюються при загартуванні з розплаву. Особливості структури та властивостей нанокристалів, що утворились при загартуванні з розплаву.

⁵ Загальна кількість годин, відведених на дану дисципліну згідно навчального плану.

2. Властивості нанокристалів, отриманих контрольованим відпалом аморфного стану. Критерій переходу від аморфного стану до нанокристалічного.
3. Фізичні властивості нанокристалів, отриманих в результаті мегапластичної деформації аморфного стану. Принцип рециклічності при мегапластичній деформації.
4. Зміна механічних властивостей при переході з аморфного стану в нанокристалічний. Механізми пластичної деформації та природа аномальної залежності Холла-Петча в нанокристалах.
5. Структурна класифікація нанокристалів з позицій їх деформаційної поведінки. Особливості механічних властивостей аморфно-нанокристалічних сплавів.
6. Магнітні явища в нанокристалах із сильною міжзеренною взаємодією. Магнітні властивості сплавів «Файнмет», «Наноперм», «Термоперм».
7. Ефект пам'яті форми для нанокристалів, отриманих контрольованим відпалом аморфного стану. Застосування наноматеріалів, отриманих гартування із розплаву.

РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА⁶:

Основна: (Базова)

1. А.П. Шпак, В.І. Лисов, Ю.А. Куницький, Т.Л. Цареградська. Кристалізація і аморфізація металевих систем. Київ: Академперіодика, 2002 – 208 с.
2. Шпак А.П., Куницький Ю.А., Коротченков О.О., Смик С.Ю. Квантові низькорозмірні системи. Київ: Академперіодика, 2003. – 312 с.
3. А.М. Глезер, И.Е. Пермькова. Нанокристаллы, закаленные из расплава. Москва, Физ.-мат.лит, 2012. – 360 с.
4. Аморфные металлические сплавы / Под ред.Ф.Е. Любарского. М., 1987. 582 с.
5. Гридчин В.А., Драгунов В.П., Неизвестный И.Г. Основы наноэлектроники: Учебное пособие. М.: Физматкнига, 2006. – 496 с.
6. В.А. Лихачев, В.Е. Шудегов. Принципы организации аморфных структур. Издательство С.-Петербургского унив-та, 1999. – 228 с.
7. Металлические стекла. Вып. 1: Ионная структура, электронный перенос и кристаллизация / Под ред. Г. Гюнтеродта, Г. Бека. М., 1983. 376 с.
8. Судзуки К., Фудзимори Х., Хасимото К. Аморфные металлы. М., 1987. 328 с.
9. Л.А. Булавін, В.І. Лисов, С.Л. Рево, В.І. Оглобля, Т.Л. Цареградська. Фізика іонно-електронних рідин. Монографія. Київ, Вид.-поліграфічний центр „Київський університет”, 2008, 384 с.
10. М. Фольмер. Кинетика образования новой фазы. М.; Наука, 1986
11. Ридли Б. Квантовые процессы в полупроводниках / Перевод с англ. И. П. Звягина, А. Г. Миронова. М.: Мир, 1986. – 304 с.
12. <http://www.twirpx.com/file/506476/>

⁶ В тому числі Інтернет ресурси

Додаткова:

1. А.П. Шпак, В.И. Лисов, Ю.А. Куницкий. Кластерные и наноструктурные материалы, т.2, Київ: Академперіодика, 2002 – 539с.
2. Фельц А. Аморфные и стеклообразные неорганические твердые тела. М., 1986. 558 с.
3. Дембовский С. А. Чечеткина Е. А. Стеклообразование. М., 1990. 279 с.
4. Абросимова Г.Е. Эволюция структуры аморфных сплавов. Успехи физических наук. Том 181, № 12, 2011, с.1265.
5. А.М. Глезер, Аморфные и нанокристаллические структуры: сходства, различия, взаимные переходы. Рос. хим. ж., 2002, т. XLVI, №5, с.57-63.
6. Имри Й. Введение в мезоскопическую физику. М.: Физматлит, 2004. – 304 с.
7. <http://gen.phys.univ.kiev.ua/wp-content/uploads/2013/02/thermodynamic.pdf>
8. https://docs.google.com/file/d/1DkSrmiB98ng7ALS9SsKugThO3bgtzyxzmzSNk4AXFl_V2Vwp_y_XW3TC6gT5/edit
9. <http://www.twirpx.com/file/142514/>
10. <http://www.twirpx.com/file/33385/>
11. <http://www.twirpx.com/file/360775/>