

**НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ МАГНЕТИЗМУ ІМЕНІ В.Г. БАР'ЯХТАРА
НАЦІОНАЛЬНОЇ АКАДЕМІЇ НАУК УКРАЇНИ
(ІМАГ НАН УКРАЇНИ)**

ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор
ІМаг НАН України
член-кор. НАН України

_____Олександр ТОВСТОЛИТКІН
«24» липня 2025 р.

РОБОЧА ПРОГРАМА НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ (Силабус)

Н 4 ВИБРАНІ РОЗДІЛИ ФІЗИКИ ТВЕРДОГО ТІЛА
(шифр та назва дисципліни)

для аспірантів

спеціальності 105 (Е6) Прикладна фізика та наноматеріали

третього освітнього (освітньо-наукового) рівня
вищої освіти – доктора філософії

Київ – 2025

Розробник:

Доктор фіз.-мат. наук _____ Герасимчук Ігор Вікторович
(підпис)

Робочу програму узгоджено науково-методичною радою

Протокол від 23.07.2025р. № 1

Голова науково-методичної ради _____ Ольга САЛЮК
(підпис)

Робочу програму затверджено Вченою радою ІМаг НАН України

Протокол від 24 липня 2025 № 8-25

Голова Вченої ради _____ Олександр ТОВСТОЛИТКІН
(підпис)

Робочу програму погоджено з гарантом освітньої програми (керівником освітньої програми): Прикладна фізика та наноматеріали 25 липня 2025 р.
(назва освітньої програми)

Гарант освітньої програми _____ Володимир ГОЛУБ
(підпис)

Пролонговано Вченою радою ІМаг НАН України:

навчальні роки пролонгації	Голова Вченої ради ІМаг НАН України	підпис	№ протоколу, дата протоколу
20____/ 20____			
20____/ 20____			
20____/ 20____			
20____/ 20____			



ВИБРАНІ РОЗДІЛИ ФІЗИКИ ТВЕРДОГО ТІЛА

Робоча програма навчальної дисципліни (Силабус)

Реквізити навчальної дисципліни

Рівень вищої освіти	Третій (освітньо-науковий)
Галузь знань	10 Природничі науки
Спеціальність	105 (Е6) Прикладна фізика та наноматеріали
Освітня програма	Прикладна фізика та наноматеріали
Статус дисципліни	Нормативна
Форма навчання	Очна (денна)
Рік підготовки, семестр	1 курс, весняний семестр
Обсяг дисципліни	4 кредити: 120 годин (денна: 36 годин – лекції, 18 годин – практичні заняття, 66 годин – СРС)
Семестровий контроль/контрольні заходи	Екзамен/МКР
Розклад занять	http:// imag.kyiv.ua
Мова викладання	Українська
Інформація про керівника курсу / викладачів	Лектор, практичні заняття: д.ф.-м. н. Герасимчук Ігор Вікторович e-mail: igor.gera@gmail.com моб. +38(096) 0112547
Розміщення курсу	http:// imag.kyiv.ua

Програма навчальної дисципліни

Опис навчальної дисципліни, її мета, предмет вивчення та результати навчання

Опис дисципліни. Програму навчальної дисципліни «Вибрані розділи фізики твердого тіла» складено відповідно до освітньо-наукової програми «Прикладна фізика та наноматеріали» підготовки доктора філософії спеціальності 105(Е6) «Прикладна фізика та наноматеріали». В результаті вивчення дисципліни «Вибрані розділи фізики твердого тіла» аспірант повинен знати основні поняття фізики твердого тіла, актуальні напрямки її сучасного розвитку; вміти орієнтуватися в сучасних тенденціях розвитку фізики твердого тіла, перспективах практичного застосування сучасних розробок, встановлення взаємозв'язків між різними галузями. Дисципліна дає загальні уявлення про сучасні технології, що базуються на принципах і закономірностях фізики твердого тіла, питання сучасних підходів і методи вивчення нанооб'єктів, низькорозмірних систем (композитів), сучасних методів модифікації твердих тіл з метою надання їм необхідних властивостей, а також методи їх контролю і діагностики.

Мета навчальної дисципліни. Метою навчальної вивчення дисципліни є формування у майбутніх фахівців стійких знань та розуміння основних понять, актуальних задач та тенденцій розвитку в галузі

фізики твердого тіла, уміння використовувати отримані знання при подальших наукових дослідженнях, а також у своїй практичній діяльності.

Предмет навчальної дисципліни. Предметом вивчення даної дисципліни є основні тенденції розвитку сучасної фізики твердого тіла, сучасні технології, що базуються на принципах і закономірностях фізики твердого тіла, сучасні методи вивчення наноб'єктів, низькорозмірних систем, методи модифікації твердих тіл з метою надання їм необхідних властивостей, методи контролю і діагностики властивостей твердих тіл.

Програмні результати навчання:

Компетентності:

ЗК 1. Здатність проводити критичний аналіз, оцінку і синтез нових і складних ідей, переосмислювати наявне та створювати нове цілісне знання та/або професійну практику, розв'язувати значущі наукові та інші проблеми.

ЗК 2. Здатність використовувати у професійній діяльності сучасні знання з різних наук, у тому числі міждисциплінарного характеру.

ФК 01. Здатність проводити теоретичні й експериментальні дослідження, комбінувати та зв'язувати їх методи, інтерпретувати одержані результати з метою виявлення властивостей та характеристик досліджуваних об'єктів в галузі прикладної фізики та нанотехнологій

ФК 07. Здатність розуміти та застосовувати цифрові технології та прикладні математичні пакети для розв'язування фізичних задач, аналізу результатів експериментальних досліджень, моделювання фізичних процесів та систем.

Результати навчання:

ПРН 1. Системні знання у галузі фізики та інших природничих наук, включаючи оволодіння методами наукового дослідження при здійсненні професійної діяльності.

ПРН 3. Знання методики проведення теоретичних та експериментальних досліджень, основних принципів системного та синергетичного аналізу, розуміння методів моделювання та фізичних моделей в прикладній фізиці.

ПРН 6. Вміння орієнтуватися в наукових проблемах у професійній сфері, знаходити оптимальні шляхи їх розв'язання.

ПРН 7. Вміння критично аналізувати, оцінювати і синтезувати нові складні ідеї, які заслуговують на рецензовану публікацію на національному або міжнародному рівні.

ПРН 8. Вміння обирати теоретичні й експериментальні методи дослідження, відповідні методи системного і синергетичного аналізу, застосовувати моделі та методи моделювання та інноваційні підходи для розв'язання складних завдань і проблем в науково-дослідній та/або інноваційних сферах.

Пререквізити та постреквізити дисципліни (місце в структурно-логічній схемі навчання за відповідною освітньою програмою)

Пререквізити. Передумовою для вивчення дисципліни є наявність ступеня магістра фізики. Дисципліна базується на знаннях фізики твердого тіла, фізики напівпровідників, діелектриків, сегнетоелектриків, металів, магнетиків, методів експериментальних досліджень, вищої математики та методів математичного моделювання, що викладаються під час навчання на 1 – 4 курсах та в магістратурі. Необхідним також є базовий рівень володіння англійською мовою.

Постреквізити. Навчальна дисципліна «Вибрані розділи теоретичної фізики» є однією з основ формування наукової складової структурно-логічної схеми освітньої програми. Компетентності, знання, уміння та досвід, отримані в процесі вивчення дисципліни «Вибрані розділи фізики твердого тіла» використовуються при засвоєнні освітнього компонента «Фазові переходи та критичні явища» і є необхідними для якісного виконання наукових досліджень за темою дисертації.

Зміст навчальної дисципліни

На вивчення навчальної дисципліни відводиться 120 годин/ 4 кредити ECTS.

Рекомендований розподіл навчального часу

Семестр	Всього (кредитів/ годин)	Розподіл за видами занять (годин)			СРС (годин)	Модульні контрольні роботи (кількість)	Індивідуальні завдання (вид)	Семестровий контроль (вид)
		Лекції	Практичні	Лабораторні				
2	4/120	36	18	-	66	1	–	екзамен

Дисципліна «Вибрані розділи фізики твердого тіла» включає наступні теми:

Тема 1. Кристалічна структура. Типи зв'язку у кристалах. Основи зонної теорії твердих тіл.

Тема 2. Актуальні питання фізики напівпровідникових матеріалів

Тема 3. Актуальні питання фізики сегнетоелектричних матеріалів

Тема 4. Актуальні питання фізики феромагнітних матеріалів

Тема 5. Гігантський магнітоопір.

Тема 6. Поверхневі плазмони. Явище поверхневого підсилення електромагнітного випромінювання

Тема 7. Нові класи наноматеріалів.

Тема 8. Метаматеріали.

Тема 9. Експериментальні методи дослідження властивостей твердих тіл.

Тема 10. Надпровідність та надплинність.

Навчальні матеріали та ресурси

Базова література.

1. Поплавко Ю. М. П Фізика твердого тіла : підручник. В 2-х томах. / Ю. М.Поплавко. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, Вид-во «Політехніка», 2017. –Том 1: Структура, квазічастинки, метали, магнетики. – 415 с.
2. Поплавко Ю. М. П Фізика твердого тіла : підручник. В 2-х томах. / Ю. М.Поплавко. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, Вид-во «Політехніка», 2017. –Том 2: Діелектрики, напівпровідники, фазові переходи. – 379 с.
3. Наноматеріали, нанотехнології, нанопристрої/ Боровий М.О., Куницький Ю.А., Каленик О.О., Овсієнко І.В., Цареградська Т.Л. – Київ: «Інтерсервіс», 2015. –350 с.
4. Solitons in low-dimensional magnets: elementary excitations with a nontrivial dispersion law / Galkina, E.G., Kireev, V.E., Ivanov, B.A. // Low Temperature Physics 48, 896 (2022)

Допоміжна література.

5. Дж. Займан. Принципы теории твердого тела. Изд. 2-е, Москва, Мир, 1974.
6. Л.Д.Ландау, Е.М. Лифшиц. Статистическая физика. Москва, Наука, 1976
7. А.И.Ансельм. Введение в теорию полупроводников. Изд. 2-е, Москва, Наука, 1978.
8. А.М.Косевич. Теория кристаллической решетки. Харьков, Вища школа, 1988.
9. П. Г. Де Жен. Сверхпроводимость металлов и сплавов. Москва, Мир, 1968.
10. Л.Д.Ландау, Е.М. Лифшиц. Электродинамика сплошных сред. Москва, Физматгиз, 1959
11. А. И. Ахиезер, В. Г. Барьяхтар, С. В. Пелетминский, Спиновые волны. – Москва, Наука, 1967.
12. В.З. Кресин. Сверхпроводимость и сверхтекучесть. Москва, Наука, 1978.

13. Н.Н. Боголюбов. Квазисредние в задачах статистической физики, Избранные труды в трех томах, том 3, Киев, Наукова Думка, 1971.
14. Фейнмановские лекции по физике. Том 7 – физика сплошных сред.
15. В.Г. Барьяхтар, Б.А. Иванов. Магнетизм- что это?. Киев, Наукова думка, 1983, 205с. (Engl. Translation: V.G. Bar'yakhtar and B.A. Ivanov. Modern magnetism. A primer. Moskva, Mir, 1985).

Навчальний контент

Методика опанування навчальної дисципліни (освітнього компонента)

Лекційні заняття.

№	Назва теми лекції та перелік основних питань
1	Лекція 1. Кристалічна структура. Типи зв'язку у кристалах. Основи зонної теорії твердих тіл. Кристалічна ґратка. Кристалографічні площини. Різні типи зв'язку у кристалах: ван-дер-ваальсівський зв'язок, ковалентний зв'язок, іонний зв'язок, металічний зв'язок. Характер зв'язку біля поверхні. Енергетичні зони в кристалі. [1-3].
2	Лекція 2. Періодичний потенціал. Розв'язок рівняння Шредінгера у періодичному потенціальному полі кристала. Фізичний зміст обмінних інтегралів. [7,12].
3	Лекція 3. Актуальні питання фізики напівпровідникових матеріалів. Зонна структура напівпровідників. Особливості прямозонних та непрямозонних напівпровідників. Р-п переходи. [1,3,5].
4	Лекція 4. Тонкі плівки. Епітаксія. Структура поверхні і хімічний зв'язок. Границі розділу. Механізми формування, структура та електронні властивості інтерфейсу метал-напівпровідник. [6, 7, 10].
5	Лекція 5. Актуальні питання фізики сегнетоелектричних матеріалів Електричні властивості п'єзоелектриків. Діелектрична анізотропія. Електромеханічний зв'язок у п'єзоелектриках. Піроелектричний та сегнетоелектричний ефект. Термоп'єзоелектрика. П'єзо-, піросенсорика. [1,2,4].
6	Лекція 6. Актуальні питання фізики феромагнітних матеріалів Магнітні властивості металів. Моделі обмінної взаємодії в магнітних матеріалах. [7,11,12].
7	Лекція 7. Механізм утворення доменної структури феромагнетиків. Фазові переходи в феро-і феримагнетиках. [1,3,4].
8	Лекція 8. Гігантський магнітоопір. Гігантський магнітоопір (GMR) і його якісна інтерпретація на основі зонної структури металів. Гігантський магнітоопір в мультишарових структурах. Використання GMR в обчислювальній техніці. Спіновий вентиль, принцип роботи. Магнітний тунельний перехід, принципи MRAM. A magnetic tunnel junction (MTJ) device. Спінові хвилі. Спінові хвилі на границі середовищ. Способи збудження спінових хвиль. [9,10,11].
9	Лекція 9. Поверхневі плазмони. Явище поверхневого підсилення електромагнітного випромінювання Граничні умови для електромагнітного поля (ЕП) на поверхні розділу двох середовищ. Еванесцентні хвилі. Розподіл зарядів на поверхні металу при збудженні еванесцентної хвилі і фізична інтерпретація експоненціального затухання її інтенсивності. Плазмова частота і від'ємний коефіцієнт діелектричної проникності. Будова середовищ з негативним індексом рефракції в мікрохвильовому діапазоні. [1,2,5–7].
10	Лекція 10. Поверхневі плазмони, методи їх збудження. Поняття локалізованих плазмонів. Електричне поле сфери, що знаходиться в ЕП. Поляризуємість металеві сфероїдальної частинки, плазмонний резонанс. Мікроскоп на поверхневих плазмонах. Надчутливі сенсори,

	засновані на поверхневому плазмонному резонансі. Гігантське комбінаційне розсіювання (SERS - Surface-Enhanced Raman Scattering). [1-3].
11	Лекція 11. Нові класи наноматеріалів. Особливості синтезу наночастинок. Формування впорядкованих наноструктур. Поверхнева динаміка. Рівноважна конфігурація. Двовимірні, одновимірні, нульвимірні наноструктури. Нанопровідники. Нанодропи. Квантові точки. Вуглецеві квантові точки. Пористі та біоморфні наноструктури. Перспективи застосування нанотехнологій і наноматеріалів в медицині, машинобудуванні, електроніці, інформаційних технологіях, енергетиці, сільському господарстві, наномеханічних пристроях. [9,10,14].
12	Лекція 12. Метаматеріали. Загальне поняття про метаматеріали. Проходження світла в метаматеріалах. Можливості подолання дифракційної межі в оптиці, принципи роботи суперлінзи. Перспективи застосування метаматеріалів в сучасній техніці. [1,2,5,8,11,13].
13	Лекція 13. Експериментальні методи дослідження властивостей твердих тіл. Аналіз сучасних тенденцій у фізиці твердого тіла та новітніх методів експериментальних досліджень. Можливості скануючої зондової мікроскопії. Методи дослідження елементарного складу поверхневих шарів зразка. [1,2,5,8,11,13].
14	Лекція 14. Фізичні принципи та методики застосування різних видів спектральних досліджень. Термостимульована люмінесценція. Спектроскопія поверхнево-підсиленого комбінаційного розсіювання. [1,2,5,8,11,13].
15	Лекція 15. Надпровідність і надплинність. Квантові колективні явища — надплинність, надпровідність, феромагнетизм. Конденсація Бозе-Ейнштейна. Досліди Капиці. Критерій Ландау надплинності. Надпровідність. Рівняння Гінзбурга-Ландау. [1,2,5,8,11,13].
16	Лекція 16. Надпровідники першого та другого роду, вихори Абрикосова. Технічне застосування надпровідників. Теорія квазісередніх Боголюбова. Високотемпературна надпровідність. [1,2,5,8,11,13].

Практичні заняття

№	Назва теми заняття та перелік основних питань
1	Класифікація ґраток Браве. Площини та напрямки в кристалі, індекси Міллера. Координаційне число. Порівняння різних типів зв'язку в кристалах. Утворення енергетичних зон у спрощеній моделі кристала. Розв'язок рівняння Шредінґера у періодичному потенціальному полі кристала. [1-3].
2	Прямозонні та непрямоzonні напівпровідники. Домішкові стани. Р-п переходи. Випромінювальна та безвипромінювальна рекомбінація. [7,12].
3	Пружні хвилі в кристалах. Граничні умови. Механізми електромеханічного зв'язку. П'єзоелектричний резонанс. [1,3,5].
4	Механізм утворення доменної структури феромагнетиків. [6, 7, 10].
5	Гігантський магнітоопір. Спіновий вентиль. Спінові хвилі. [1,2,4].
6	Поверхневі плазмони у металізованих наноструктурованих поверхнях. Спектри поверхнево підсиленого комбінаційного розсіювання. [7,11,12].
7	Еволюція морфології наночастинок. Методи синтезу наноструктурованих матеріалів. [1,3,4].
8	Проходження світла в метаматеріалах. [9,10,11].
9	Квантові колективні явища — надплинність, надпровідність, феромагнетизм.. [1,2,5–7].

Самостійна робота аспіранта

З метою чіткої організації самостійної роботи студентів і задля підвищення якості засвоєння навчального матеріалу та вироблення ґрунтовних навичок наукової діяльності пропонуються індивідуальні завдання у формі самостійної підготовки конспектів та рефератів із вибраних тем. Самостійна робота здобувача наукового ступеня доктора філософії є основним засобом засвоєння навчального матеріалу у вільний від навчальних занять час і включає:

№ з/п	Вид самостійної роботи	Кількість годин СРС
1	Підготовка до аудиторних занять	30
2	Підготовка до МКР	16
3	Підготовка до екзамену	20

Політика та контроль

Політика навчальної дисципліни (освітнього компонента)

Система вимог, які викладач ставить перед аспірантом:

- правила відвідування занять (згідно розкладу і згідно загально-інститутського розпорядку);
- правила поведінки на заняттях (активність на практичних заняттях є обов'язковою, бали за активність на практичних заняттях не ставляться, відключення телефонів є обов'язковим);
- правила призначення заохочувальних та штрафних балів (штрафні бали не призначаються, заохочувальні бали призначаються суворо згідно підрозділу 8 цього силабусу);
- політика дедлайнів та перескладань (згідно загально-інститутського розпорядку);
- політика щодо академічної доброчесності (згідно загально-інститутського розпорядку);

Види контролю та рейтингова система оцінювання результатів навчання (PCO)

Поточний контроль: опитування за темою заняття, МКР.

Календарний контроль: проводиться двічі на семестр як моніторинг поточного стану виконання вимог силабусу.

Семестрова атестація проводиться у вигляді екзамену. Для оцінювання результатів навчання застосовується 100-бальна рейтингова система і інститутська шкала.

Умови допуску до семестрового контролю: відсутні.

Рейтинг аспіранта з дисципліни складається з балів, які він отримує:

- 1) за роботу на аудиторних заняттях;
- 2) за модульну контрольну роботу (МКР);
- 3) за відповідь на заліку.

Система рейтингових балів

1) Аудиторні заняття. Ваговий коефіцієнт дорівнює 4. Максимальна кількість балів, які може отримати аспірант на лабораторних заняттях становить $12 \times 4 = 48$ балів. Нарахування балів на одному практичному занятті:

- відмінні відповіді 4 балів;
- дуже добрі, добрі відповіді 3,2 балів;
- задовільні, достатні відповіді 1 бал.

2) Модульна контрольна робота (МКР). Ваговий коефіцієнт дорівнює 12. Максимальна кількість балів за контрольну роботу становить $1 \times 12 = 12$ балів. Нарахування балів за контрольну роботу:

- «відмінно», повна відповідь (не менше 90 % потрібної інформації) 11-12 балів;
- «добре», достатньо повна відповідь (не менше 75 % потрібної інформації або незначні неточності) 8-10 балів;
- «задовільно», неповна відповідь (не менше 60 % потрібної інформації та деякі помилки) 6-7 балів;
- «незадовільно», незадовільна відповідь (менше 60 % потрібної інформації) 0.

3). Екзамен. Критерії оцінювання. Завдання містить два теоретичні питання, кожне з яких оцінюються у 20 балів. Всього $2 \times 20 = 40$ балів.

Нарахування балів за відповідь на заліку:

- повна відповідь (не менше 90 % потрібної інформації) 36-40 балів;
- достатньо повна відповідь (не менше 75 % потрібної інформації) 30-35 балів;
- неповна відповідь (не менше 60 % потрібної інформації) 24-29 балів;
- незадовільна відповідь (менше 60 % потрібної інформації) 0.

Якщо аспірант протягом семестру набрав понад 60 балів, він може отримати залік автоматом.

Для виставлення фінальних оцінок рейтинг переводиться у оцінки відповідно до таблиці.

Таблиця відповідності рейтингових балів оцінкам за інститутською шкалою:

Кількість балів	Оцінка
90-100	Відмінно
75-89	Добре
60-74	Задовільно
Менше 60	Незадовільно
Не виконано інші умови допуску до заліку	Не допущено

Додаткова інформація з дисципліни (освітнього компонента)

Перелік питань, які виносяться на семестровий контроль:

1. Типи зв'язку у кристалах
2. Енергетичні зони в кристалі. Відмінність енергетичної структури ізолюваного атома від атома в кристалічній ґратці.
3. Пояснення утворення енергетичних зон в кристалі на основі хвильової природи електронів в одновимірній моделі кристала.
4. Періодичний потенціал. Розв'язок рівняння Шредінгера у періодичному потенціальному полі кристала
5. Зонна структура напівпровідників. Р-п переходи.
6. Тонкі плівки. Епітаксія.
7. Електричні властивості п'єзоелектриків.
8. Піроелектричний та сегнетоелектричний ефект.
9. Термоп'єзоелектрика.
10. Механізм утворення доменної структури феромагнетиків.
11. Гігантський магнітоопір
12. Спіновий вентиль, спіновий діод
13. Магнітний тунельний перехід
14. Спінові хвилі.
15. Еванесцентні хвилі біля поверхні розділу двох середовищ.
16. Плазмова частота, від'ємний коефіцієнт діелектричної проникності
11. Поверхневі плазмони, локалізовані плазмони. Плазмонний резонанс.
18. Гігантське комбінаційне розсіювання
19. Двовимірні, одновимірні, нульвимірні наноструктури.

20. Пористі та біоморфні наноструктури.
21. Метаматеріали.
22. Спінові хвилі (магнони) та поляризаційні хвилі (м'які моди) у феромагнетиках та сегнетоелектриках.
23. Надплинність, надпровідність, феромагнетизм.
24. Конденсація Бозе-Ейнштейна.
25. Досліди Капиці.
26. Критерій Ландау надплинності.
27. Рівняння Гінзбурга-Ландау.
28. Надпровідники першого та другого роду
29. Вихори Абрикосова. Теорія квазісередніх Боголюбова.
30. Високотемпературна надпровідність Технічне застосування надпровідників.