

**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)

В4 СПІНТРОНІКА

(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, професор _____ Товстолиткін Олександр Іванович
(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____			

СПІНТРОНІКА

(для здобувачів III (освітньо-наукового) рівня вищої освіти)

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	2 курс, осінній семестр
Обсяг дисципліни	2 кредити: 60 годин (денна: 6 годин – лекції, 12 годин – лабораторні, 42 години – СР)
Семестровий контроль/контрольні заходи	Залік
Розклад занять	Час і місце проведення аудиторних занять викладено на сайті Інституту магнетизму НАН України та МОН України http://imag.kyiv.ua
Мова викладання	Українська
Інформація про керівника курсу / викладачів	Лектор: доктор фізико-математичних наук, професор Товстолиткін Олександр Іванович Електронна пошта atov@imag.kiev.ua
Розміщення курсу	http://imag.kyiv.ua

Програма навчальної дисципліни

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

Опис дисципліни.

Досягнення сучасної науки в сфері високих технологій – електроніці, інформаційних технологіях – пов'язані з фундаментальними і прикладними дослідженнями, спрямованими на підвищення швидкодії і мінімізацію енергетичних затрат в пристроях зберігання, обробки і перетворення інформації. На даний час актуальним є розвиток нового напрямку з розробки фізичних основ створення приладів, заснованих на використанні спінового стану їх елементів як ідентифікаторів інформації. Цей напрям, який отримав назву «спінова електроніка» або «спінтроніка», розглядає питання експериментального дослідження і теоретичного опису методів керування квантовими станами електронів у нановимірних структурах і спрямований на розробку високотехнологічних пристроїв на основі виявлених ефектів і явищ. У межах запропонованого навчального курсу буде викладено фізичні основи спінтроніки, висвітлено фізичні принципи створення та керування спіною орієнтацією квантових об'єктів, розглянуто особливості спінових явищ в шаруватих наноструктурах. Будуть описані ключові властивості матеріалів спінтроніки та принципи функціонування пристроїв на їх основі.

Мета дисципліни – ознайомлення аспірантів з методами керування квантовими станами електронів у нановимірних системах та засвоєння теоретичних основ спін-залежних явищ у шаруватих тонкоплівкових структурах.

Завдання – сформувати у аспірантів базові уявлення про принципи кодування та передачі інформації в твердотільних системах з використанням квантових об'єктів як носіїв інформації та оволодіння навичками застосування отриманих знань для розв'язання прикладних задач фізики конденсованого стану, магнетизму та квантової інформатики.

Програмні 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.

ЗК 4. Здатність застосовувати сучасні інформаційно-комунікаційні технології у різних видах професійної діяльності.

ЗК 5. Здатність знаходити, обробляти й аналізувати необхідну інформацію для вирішення проблем й прийняття рішень.

ЗК 11. Здатність спілкуватися з науковою спільнотою та широкою громадськістю (в діалозі) в галузі своєї спеціалізації (в широких межах).

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 02. Здатність визначати завдання фізичного експерименту, самостійно проводити експериментальні дослідження за допомогою сучасного обладнання та вимірювальної апаратури, накопичувати та аналізувати дані, оцінювати можливі похибки та невизначеності.

ФК 03. Здатність осмислювати та аналізувати результати експериментальних досліджень, встановлювати зв'язок з теоретичними моделями, вирізняти із накопичених спостережень відтворювані експериментальні факти. Здатність адаптувати і узагальнювати результати сучасних досліджень в галузі прикладної фізики для вирішення наукових і практичних проблем.

ФК 06. Здатність до впровадження нових знань (наукових даних) в науку, освіту та інші сектори суспільства.

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.

ФК 08 Здатність проводити дослідження складних систем, їх системний та синергетичний аналіз, використовувати моделі та методи моделювання в наукових дослідженнях.

Програмні результати навчання

ПРН 2. Системні знання поглибленого рівня в галузі прикладної фізики, наукомістких технологій, нових речовин і матеріалів, методів дослідження їх властивостей, зокрема, знання сучасних досягнень та інноваційних прикладних рішень, в тому числі на стику різних галузей науки.

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 4. Знання сучасних концепцій розвитку інформаційно-комунікаційних технологій, основ програмування певних процесів та об'єктів за темою наукового дослідження.

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

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.

ПРН 10. Вміння збирати та інтерпретувати наукову та фахову інформацію, з використанням сучасних інформаційно-комунікаційних технологій та пошукових систем.

ПРН 13. Вміння формулювати свої професійні висновки, особисті результати і досягнення та розумно їх обґрунтовувати для фахової та не фахової аудиторії.

ПРН 15. Кваліфіковано відображати результати наукових досліджень у наукових статтях у фахових виданнях, вести конструктивний діалог з рецензентами та редакторами.

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

Вивчення даної дисципліни базується на дисциплінах «Загальна фізика: електрика та магнетизм», «Фізика магнітних явищ» першого та другого рівнів вищої освіти. Аспірант також має оволодіти дисциплінами «Вибрані розділи фізики твердого тіла», «Вибрані методи комп'ютерного аналізу» і «Вибрані розділи магнетизму» третього рівня освіти. Необхідним є базовий рівень володіння англійською мовою для читання посібників та оригінальних статей в англомовних журналах.

Знання, отримані аспірантами з дисципліни «Спінтроніка», використовуються при підготовці наукових доповідей та наукових статей, а також при захисті дисертації.

Зміст навчальної дисципліни

Назви тем	Кількість годин			
	Всього	У тому числі		
		Лекції	Лабораторні заняття	СР
Тема 1. Магнітні наноструктури: методи виготовлення та дослідження.	10	2	2	6
Тема 2. Спін-залежні явища в шаруватих металевих наноструктурах та магнітних тунельних контактах.	26	2	6	18
Тема 3. Ефект спін-трансферного моменту обертання. Сучасні прикладні застосування спінтроніки.	22	2	4	16
Разом	58	6	12	40
Залік	2			2
Всього годин	60	6	12	42

Навчальні матеріали та ресурси

Базова література.

1. О.І. Товстоли́ткін, М.О. Боровий, В.В. Курилюк, Ю.А. Куницький. *Фізичні основи спінтроніки. Навчальний посібник*. – Вінниця, Нілан-ЛТД, 2014. – 500 с.
2. А.М. Погорілий, С.М. Рябченко, О.І. Товстоли́ткін. *Спінтроніка. Основні явища. Тенденції розвитку* – УФЖ. Огляди, 2010, т. 6, №1, С. 37–97 (http://archive.ujp.bitp.kiev.ua/files/reviews/6/1/r06_01_03pu.pdf).
3. A. V. Chumak, P. Kabos, M. Wu, ..., R. Verba, et al., *Advances in Magnetism Roadmap on Spin-Wave Computing*, IEEE Trans. Magn. 58, 0800172 (2022).
4. I. Zutich, J. Fabian, S. Das Sarma. *Spintronics: Fundamentals and applications*. – Reviews of Modern Physics, 2004, vol. 76, No. 2, 323 – 410.
5. M. Getzlaff. *Fundamentals of Magnetism. Chapter 17. Applications*. Berlin-Heidelberg-New York, Springer, 2008. – 387 p.
6. J.M.D. Coey. *Magnetism and Magnetic Materials*. – Cambridge, Cambridge University Press, 2010. – 614 p.

Допоміжна література.

7. Е.С. Боровик, В.В. Еременко, А.С. Мильнер. *Лекции по магнетизму*. – М., Физматлит, 3-е изд., 2005. – 512 с.
8. *Magnetoelectronics*. Ed. by M. Johnson. – Elsevier, 2004, - 396 p.
9. A.P. Guimaraes. *Principles of Nanomagnetism*. – Springer, Berlin-Heidelberg-New York, 2008. – 222 p.

Навчальний контент

Методика опанування навчальної дисципліни (освітнього компонента)

Лекційні заняття

№	Назва теми лекції та перелік основних питань (перелік дидактичних засобів, посилання на літературу та завдання на СР)
1	Тема 1. Магнітні наноструктури: методи виготовлення та дослідження [1–7].
2	Тема 2. Спін-залежні явища в шаруватих металевих наноструктурах та магнітних тунельних контактах [1–7].
3	Тема 3. Ефект спін-трансферного моменту обертання. Сучасні прикладні застосування спінтроники [1–7].

Лабораторні заняття

№	Назва теми заняття та перелік основних питань (перелік дидактичного забезпечення, посилання на літературу та завдання на СР)
1	Лабораторне заняття 1. Методи вимірювання електричного опору та магнітоопору [1–10].
2	Лабораторне заняття 2. Гігантський магнітоопір в багатошарових наноструктурах [1–10].
3	Лабораторне заняття 3. Явища в магнітних тунельних контактах [1–10].
4	Лабораторне заняття 4. Колосальний магнітоопір в перовскітних системах [1–10].
5	Лабораторне заняття 5. Матеріали спінтроники [1–10].
6	Лабораторне заняття 6. Пристрої спінтроники та їх застосування [1–10].

Контрольні роботи

Метою контрольної роботи є перевірка вмінь аспірантів самостійно розв'язувати наукові задачі, вмінь використання відповідних теоретичних, експериментальних методів та програмних продуктів.

Перевірка практичних навичок відбувається у вигляді контрольної роботи, завданнями до якої є складання презентації власних наукових досліджень в галузі спінтроники. Перевірка знання теоретичного матеріалу на контрольних заходах відбувається у вигляді усних запитань викладача та відповідей аспіранта з окремих розділів програми.

Самостійна робота аспіранта

№	Назва теми лекції та перелік основних питань (перелік дидактичних засобів, посилання на літературу та завдання на СР)	Кількість годин СР
1.	Тема 1. Магнітні наноструктури: методи виготовлення та дослідження [1–10].	6

2.	Тема 2. Спін-залежні явища в напружених металевих наноструктурах та магнітних тунельних контактах [1–10].	18
3.	Тема 3. Ефект спін-трансферного моменту обертання. Сучасні прикладні застосування спінтроники [1–10].	16

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: тести

Календарний контроль: контроль виконання самостійної роботи та завдань лабораторних занять проводиться двічі на семестр у формі тестів як моніторинг поточного стану виконання вимог силабусу.

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

Рейтинг аспірантів 2 курсу з курсу «Спінтроніка» складається з балів, які вони отримують за:

- 1) СР
- 2) Лабораторні заняття

Система рейтингових балів та критерії оцінювання.

Аспірантам, які успішно виконують СР (самостійна робота аспірантів), можуть нараховуватися за семестр максимум 30 балів. СР полягає у самостійній роботі із вивчення лекційного матеріалу та підготовки до лабораторних занять.

Аспірантам, які успішно виконують завдання самостійної роботи та лабораторних занять, можуть нараховуватися за семестр максимум 70 балів.

Сума вагових балів контрольних заходів з курсу «Спінтроніка» протягом семестру складає $R_C = 100$ балів.

Рейтингова шкала з курсу «Спінтроніка» складає $R_D = R_C = 100$ балів.

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 екзамену	Не допущено

Якщо ж аспірант протягом семестру набрав менше 60 балів, він має виконати контрольну роботу.

Якщо аспірант набрав протягом семестру 60 балів і більше, але хоче підвищити свою рейтингову оцінку, він може це зробити шляхом складання залікової контрольної роботи у вигляді тесту. При цьому, стартовий рейтинг не враховується.

Додаткова інформація з дисципліни (освітнього компонента)

Перелік питань, які виносяться на семестровий контроль:

1. Вимоги до компонентів магнітних наноструктур. Методи виготовлення магнітних наноструктур.
2. Джерела розсіювання електронів у багатошарових наноструктурах.
3. Квантове тунелювання. Прозорість тунельного бар'єру. Спін-залежні явища у магнітних тунельних контактах.
4. Тунельний магнітоопір. Залежність тунельного магнітоопору від магнітного поля та температури.
5. Спін-залежні явища в структурах феромагнетик/ немагнітний метал/ феромагнетик. Гігантський магнітоопір.
6. Резисторна модель гігантського магнітоопору. Проблема невідповідності опорів.
7. Види багатошарових магнеторезистивних структур: (а) з антиферомагнітним зв'язком; (б) з подвійною коерцитивністю (псевдоспінові клапани); (в) спінові клапани. Спільні та відмінні риси тунельного магнетоопору і гігантського магнетоопору.
8. Ефект спін-трансферного моменту обертання. Умови реалізації ефекту спін-трансферу. Перспективність використання ефекту спін-трансферу в комірках пам'яті.
9. Колосальний магнітоопір. Магнітні фазові переходи та переходи метал-діелектрик у системах з колосальним магнітоопором.
10. Вимоги до компонентів магнітних гетероструктур. Матеріали спінтроніки: принципи класифікації.
11. Магнітовпорядковані матеріали спінтроніки: металічні феромагнетики, половинні метали та магнітні напівметали.
12. Магнітні напівпровідники. Переваги та недоліки магнітних напівпровідників порівняно з іншими матеріалами спінтроніки.
13. Сучасні прикладні застосування спінтроніки: елементи зчитування в жорстких дисках, сенсори магнітних полів, наноосцилятори, детектори електромагнітного випромінювання гіга- та терагерцового діапазонів.
14. Магнітна пам'ять з довільним доступом (MRAM) як найбільш імовірний кандидат на роль універсальної пам'яті обчислювальних пристроїв (швидкодія, енергонезалежність).

Можливість зарахування сертифікатів проходження дистанційних чи онлайн курсів за даною тематикою не передбачена.

Робочу програму навчальної дисципліни (Силабус):

Складено доктором фізико-математичних наук, професором Товстолиткіним Олександром Івановичем.