

**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 СПІН-ЗАЛЕЖНІ ЯВИЩА В НАНОРОЗМІРНИХ СТРУКТУРАХ

(шифр та назва дисципліни)

для аспірантів

спеціальності 104 (Е5) Фізика та астрономія
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): Фізика 25 липня 2025 р.

(назва освітньої програми)

Гарант освітньої програми _____ Ігор ГЕРАСИМЧУК
(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____			

СПІН-ЗАЛЕЖНІ ЯВИЩА В НАНОРОЗМІРНИХ СТРУКТУРАХ

(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	104 (E5) Фізика та астрономія
Освітня програма	Фізика
Статус дисципліни	За вибором
Форма навчання	Очна (денна)
Рік підготовки, семестр	2 курс, осінній семестр
Обсяг дисципліни	3 кредити: 90 годин (денна: 12 годин – лекції, 12 годин – лабораторні, 66 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 «Спін-залежні явища в нанорозмірних структурах» буде викладено фізичні основи спінтроніки, висвітлено фізичні принципи створення та керування спіновою 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 – сформулювати 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 результати навчання.

Компетентності:

ЗК01. Здатність генерувати нові ідеї (креативність)

СК01. Здатність виявляти, ставити та вирішувати проблеми дослідницького характеру в сфері фізики та/або астрономії, інтегрувати знання з різних галузей, оцінювати та забезпечувати якість виконуваних досліджень.

СК02. Здатність відстежувати тенденції розвитку фізики та/або астрономії, їх прикладних застосувань, критично переосмислювати наявні знання та методи фундаментальних та прикладних наукових досліджень.

СК06. Здатність застосовувати сучасні методи, методики, технології, інструменти та обладнання для проведення прикладних та фундаментальних наукових досліджень у галузі фізики та/або астрономії.

Результати навчання:

РН01. Мати сучасні концептуальні та методологічні знання з фізики та/або астрономії та дотичних до них міждисциплінарних напрямів, а також необхідні навички, достатні для проведення фундаментальних і прикладних наукових досліджень з метою отримання нових знань та/або здійснення розробок та інновацій.

РН02. Аналізувати та оцінювати стан і перспективи розвитку фізики та/або астрономії, а також дотичних міждисциплінарних напрямів.

РН04. Формулювати і перевіряти гіпотези; використовувати для обґрунтування висновків належні докази, зокрема, результати теоретичних і експериментальних досліджень, математичного моделювання, комп'ютерного експерименту, а також наявні літературні дані.

РН05. Розробляти моделі процесів і систем у фізиці та/або астрономії та дотичних міждисциплінарних напрямках, використовувати їх у науково-дослідницькій діяльності для отримання нових знань та/або створення розробок та інноваційних продуктів.

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 «Актуальні проблеми фізики магнітних явищ», «Сучасні методи моделювання в фізиці магнітних явищ» і «Вибрані розділи квантової механіки», «Математичні методи в теоретичній фізиці» третього рівня освіти. Необхідним є базовий рівень володіння англійською мовою для читання посібників та оригінальних статей в англомовних журналах.

Знання, отримані аспірантами з дисципліни «Спін-залежні явища в нанорозмірних структурах», 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.	28	4	4	20
Тема 2. Спін-залежні явища в шаруватих металевих наноструктурах та магнітних тунельних контактах.	28	4	4	20
Тема 3. Ефект спін-трансферного моменту обертання. Сучасні прикладні застосування спінтроники.	32	4	4	24
Разом	88	12	12	60
Залік	2			6
Всього годин	90	12	12	66

Навчальні матеріали та ресурси

Базова література.

1. О.І. Товстоли́ткін, М.О. Боровий, В.В. Курилюк, Ю.А. Куницький. *Фізичні основи спінтроники. 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].	20
2.	Тема 2. Спін-залежні явища в шаруватих металевих наноструктурах та магнітних тунельних контактах [1–10].	20

3.	Тема 3. Ефект спін-трансферного моменту обертання. Сучасні прикладні застосування спінтроніки [1–10].	24
----	---	----

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 спінтроники: принципи класифікації.
11. Магнітовпорядковані матеріали спінтроники: металічні феромагнетики, половинні метали та магнітні напівметали.
12. Магнітні напівпровідники. Переваги та недоліки магнітних напівпровідників порівняно з іншими матеріалами спінтроники.
13. Сучасні прикладні застосування спінтроники: 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.