

**КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ІМЕНІ ТАРАСА ШЕВЧЕНКА**

**Навчально науковий інститут високих технологій**

Кафедра теоретичних основ високих технологій



**РОБОЧА ПРОГРАМА НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ**  
***ЕЛЕКТРОННИЙ ТРАНСПОРТ В МЕЗО- ТА НАНОСИСТЕМАХ***

**для студентів**

галузь знань	10 Природничі науки
спеціальність	105 « Прикладна фізика та наноматеріали»
освітній рівень	Магістр
освітня програма	Високі технології (прикладна фізика та наноматеріали)
вид дисципліни	<b>обов'язкова</b>

Форма навчання	денна
Навчальний рік	2022/2023
Семестр	1
Кількість кредитів ECTS	<b>4.0</b>
Мова викладання, навчання та оцінювання	українська
Форма заключного контролю	залік

Викладач: Колежук О.К.

Пролонговано: на 20\_\_/20\_\_ н.р. \_\_\_\_\_ (\_\_\_\_\_) «\_\_» 20\_\_ р.  
(підпис, ПІБ, дата)

на 20\_\_/20\_\_ н.р. \_\_\_\_\_ (\_\_\_\_\_) «\_\_» 20\_\_ р.

**КИЇВ – 2022**

Розробники:

Колежук Олексій Костянтинович, професор кафедри теоретичних основ високих технологій  
Русінчук Наталя Миколаївна, асистент кафедри нанофізики конденсованих середовищ

ЗАТВЕРДЖЕНО


Зав. кафедри теоретичних основ високих технологій

 (Валерій ЛОЗОВСЬКИЙ)  
(підпис) (прізвище та ініціали)

Протокол № 3 від «21» 04 2022 р.

Схвалено науково - методичною комісією Інституту високих технологій

Протокол від «13» травня 2022 року № 4

Голова науково-методичної комісії  (Наталя РУСІНЧУК)  
(підпис) (прізвище та ініціали)

## ВСТУП

**1. Мета дисципліни** – формування у майбутніх фахівців з високих технологій у прикладній фізиці знань основних понять, принципів, закономірностей явищ переносу заряду в мезоскопічних та нанорозмірних системах, навичок застосування математичних методів опису та аналізу таких явищ, вміння користуватися цими знаннями та навичками для вирішення завдань сучасної нанофізики.

**2. Попередні вимоги до опанування або вибору навчальної дисципліни (за наявності):**

- Знання основ квантової механіки, електродинаміки, статистичної фізики, фізики твердого тіла.
- Знання основних понять і методів лінійної алгебри, розв'язання диференціальних рівнянь.

**3. Анотація навчальної дисципліни:**

Мета курсу: дати студентам розуміння закономірностей переносу заряду в мезоскопічних та нанорозмірних системах. Студенти повинні оволодіти відповідним математичним апаратом для опису електронного транспорту в мезо- і наносистемах, мати уявлення про основні наближення та їхню область застосовності, типові постановки задач, типові експериментальні об'єкти. Студенти мають навчитися розв'язувати типові прості задачі, пов'язані з балістичним електронним транспортом через дво- і багатотермінальні з'єднання, металеві та надпровідні кільця, квантові точки, контакти Джозефсона.

**4. Завдання (навчальні цілі).**

*Навчання дисципліни має на меті розвивати у студентів такі загальні та фахові компетентності:*

*ЗК1. Знання та розуміння предметної області та розуміння професійної діяльності.*

*ЗК2. Здатність спілкуватися державною та іноземною мовами як усно, так і письмово.*

*ЗК4. Навички використання інформаційних і комунікаційних технологій.*

*ЗК5. Здатність вчитися і оволодівати сучасними знаннями.*

*ЗК6. Здатність до пошуку, оброблення та аналізу інформації з різних джерел.*

*ЗК9. Здатність працювати автономно.*

*ЗК11. Здатність до подальшого навчання, яке значною мірою є автономним та самостійним.*

*ЗК12. Здатність до абстрактного мислення, аналізу та синтезу*

*ЗК13. Здатність розв'язувати складні задачі і проблеми, що потребує оновлення та інтеграції знань, часто в умовах неповної/недостатньої інформації та суперечливих вимог.*

*ЗК17. Володіння спеціалізованими концептуальними знаннями, набутими у процесі навчання та/або професійної діяльності на рівні новітніх досягнень, які є основою для оригінального мислення та інноваційної діяльності, зокрема в контексті дослідницької роботи.*

*ФК7. Здатність до абстрактного мислення, аналізу та синтезу, критичного осмислення проблем у професійній діяльності та на межі предметних галузей.*

*ФК8. Знання основних типів наноматеріалів, їх фізичних властивостей та процесів, що протікають в нанорозмірних структурах, розуміння фізичних принципів роботи наноелектронних приладів та їх використання.*

*ФК9. Здатність відслідковувати найновіші досягнення в області прикладної фізики та високих технологій, вивчаючи наукову літературу та взаємодіючи з колегами.*

*ФК10. Здатність відповідно до поставленої задачі проводити самостійно та в команді наукові дослідження фізичних систем, явищ і процесів (експериментальні, теоретичні, комп'ютерне моделювання) в галузі прикладної фізики та наноматеріалів.*

**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*)		Форми (та/або методи і технології) викладання і навчання	Методи оцінювання та пороговий критерій оцінювання (за необхідності)	Відсоток у підсумковій оцінці з дисципліни
Код	Результат навчання			
1.1	Знати основні поняття, принципи, закономірності явищ переносу заряду в мезоскопічних системах.	Лекція, практичне заняття	Тест, 60% правильних відповідей	15%
1.2	Мати уявлення: про область застосовності, типові постановки задач, експериментальні об'єкти, методи опису електронного транспорту в мезо- і наносистемах.	лекція	--/--	15%
2.1	Вміти розв'язувати типові прості задачі, пов'язані з електронним транспортом через дво- і багатотермінальні з'єднання, металеві та надпровідні кільця, квантові точки.	практичне заняття	модульні контрольні роботи	50%
4.1	Вміти самостійно розбиратися в математичному апараті, що є в літературі з мезоскопічної фізики	самостійна робота	Тест, модульні контрольні роботи	20%
4.2	Розвиток творчого підходу до розв'язування задач; розвиток логічного та аналітичного мислення.	практичне заняття, самостійна робота студентів		

## 6. Співвідношення результатів навчання дисципліни із програмними результатами навчання (необов'язково для вибіркових дисциплін які не входять до блоків спеціалізації)

Програмні результати навчання	Результати навчання дисципліни				
	1.1	1.2	2.1	4.1	4.2
ПР1. Володіти поглибленим рівнем знань у прикладній фізиці, наноматеріалознавстві, високих технологіях та споріднених областях, включаючи методики проведення експериментів і технології отримання наноматеріалів, рівень цих знань повинен бути достатнім для проведення наукових досліджень на рівні останніх світових досягнень і направленим на їх розширення та поглиблення.	+	+	+	+	+
ПР2. Використовувати знання в галузі прикладної фізики, математики, електроніки та інформаційних технологій для виконання наукових досліджень та розв'язання виробничих задач.		+	+	+	+
ПР3. Знаходити та аналізувати наукову та науково-технічну інформацію в галузі прикладної фізики та наноматеріалів із вітчизняних та зарубіжних джерел, в тому числі з використанням сучасних пошукових систем.				+	
ПР4. Виконувати аналіз спеціальної літератури, формулювати постановку наукової або науково-технічної задачі, обирати методи та методики, складати програми наукових досліджень та науково-технічних розробок у галузі прикладної фізики та наноматеріалів.	+			+	+
ПР6. Встановлювати та аргументувати нові залежності між параметрами та характеристиками фізичних систем.	+	+		+	+

## 7. Схема формування оцінки.

### 7.1 Форми оцінювання студентів

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

\*

Система оцінювання знань включає поточний, модульний та семестровий контроль знань. Результати навчальної діяльності студентів оцінюються за 100-бальною шкалою. Форми поточного контролю: оцінювання домашніх робіт, письмових самостійних завдань. Модульний контроль: одна модульна контрольна робота. Підсумковий семестровий контроль проводиться у формі заліку. Залік включає 1 теоретичне питання та 1 задачу (по 20 балів).

*Оцінювання за формами контролю:*

<b>Оцінювання</b>	<b>Min</b>	<b>Max</b>
Поточний контроль (Домашні завдання, письмові самостійні роботи)	24	40
Модульна контрольна робота	12	20
Семестровий контроль: залік	24	40
<b>Всього</b>	<b>60</b>	<b>100</b>

*Для отримання загальної позитивної оцінки з дисципліни оцінка за залік не може бути меншою 24 балів.<sup>1</sup>*

*Студент не допускається до заліку, якщо під час семестру набрав менше ніж 36 балів.<sup>2</sup>*

**7.2 Організація оцінювання:** Модульний контроль проводиться за таким графіком: модульна контрольна робота на передостанньому практичному занятті, за її результатами студенти отримують до 20 балів. Поточний контроль: протягом семестру студенти розв'язують домашні завдання та пишуть самостійні роботи на практичних заняттях, за результатами чого отримують до 40 балів. Для студентів, які набрали за результатами поточного і модульного контролю сумарно меншу кількість балів ніж критично-розрахунковий мінімум – 36 балів – для одержання заліку обов'язкове перескладання модульної контрольної роботи. Допускається до двох перескладань протягом семестру.

### 7.3 Шкала відповідності оцінок

<b>Зараховано / Passed</b>	60-100
<b>Не зараховано / Fail</b>	0-59

<sup>1</sup> У випадку коли студент на екзамені набрав менше вказаної кількості балів вони не додаються до семестрової оцінки (незалежно від кількості балів, отриманих під час семестру), в екзаменаційній відомості у колонці "бали за екзамен" ставиться "0", а в колонку «результуюча оцінка» переноситься лише кількість балів, отриманих під час семестру.

<sup>2</sup> Мінімальна кількість балів не може бути меншою ніж різниця рівня порогової оцінки (60 балів) і кількості балів винесених на екзамен (зазвичай 40) — якщо у студента менше 20 балів, він фізично не в змозі отримати позитивну оцінку. Викладач, якщо це аргументовано результатами навчання які не виносяться на екзамен, може визначити і вищий рівень мінімальної оцінки (як правило до 36 балів).

## 8. Структура навчальної дисципліни. Тематичний план лекцій і лабораторних занять

№ п/п	Назва теми	Кількість годин		
		лекції	практичні	самостійна робота
1	<i>Вступ, основні поняття мезоскопії.</i> Фізика на наномасштабах. Приклади мезоскопічних провідників. Характерні довжини і масштаби енергії, що характеризують електронний транспорт. режими електронного транспорту (дифузійний і балістичний, класичний і квантовий, когерентний, некогерентний).	2	2	8
2	<i>Дифузійний електронний транспорт.</i> Класична теорія Друде. Дифузійна провідність у виродженому електронному газі: густина станів, коефіцієнт дифузії, співвідношення Ейнштейна. Квази-рівні Фермі. Розмірні ефекти: просторовий конфайнмент, підзони, “канали транспорту”. Інтерференційні квантові поправки до дифузійного транспорту: поняття про слабку локалізацію.	2	2	8
3	<i>Балістичний електронний транспорт.</i> Ідеальний квантовий точковий контакт, квант кондактансу. Формула Ландауера для 2-термінального багатоканального неідеального контакту. Перехід від балістичного до дифузійного режиму. Мультитермінальні контакти, формалізм Ландауера-Бюттікера.	2	2	8
4	<i>Балістичний транспорт: формалізм матриць розсіювання.</i> Матриці розсіювання для двотермінального і багатотермінального випадку, їх основні властивості (унітарність, правило сум). Формули Ландауера-Бюттікера в формалізмі матриць розсіювання.	2	2	8
5	<i>Послідовні з'єднання квантових контактів.</i> Одноканальний подвійний квантовий контакт: резонансне тунелювання, перехід від балістичного до дифузійного режиму. Загальний випадок послідовних з'єднань: формалізм трансфер-матриці. Зв'язок трансфер-матриці з матрицею розсіювання, обчислення коефіцієнта пропускання через трансфер-матрицю. Кондактанс подвійного тунельного бар'єру з макроскопічними поперечними розмірами. Резонансний тунельний діод.	2	2	8
6	<i>Ефекти квантової інтерференції.</i> Ефект Аронова-Бома. Електронні стани в металевому нанокільці. Сталі струми в нанокільцях. Осциляції Аронова-Бома і осциляції Аронова-Альтшулера-Співака в кондактансі нанокільця. Розгалужувач потоку (beam splitter), обчислення кондактансу нанокільця.	4	2	16

7	<i>Квантові явища в надпровідних контактах.</i> Макроскопічна хвильова функція надпровідника. Квантування магнітного потоку. Контакт Джозефсона, формули Джозефсона. Джозефсонівська енергія. Стаціонарний ефект Джозефсона (DC). Нестационарні ефекти Джозефсона (контрольовані напругою: AC, inverse AC; контрольований струмом). SQUID.	2	2	8
8	<i>Кубіти на основі надпровідних контактів.</i> Поняття про кубіт. Фазовий кубіт, керований струмом. Фазовий кубіт, керований магнітним потоком. Зарядовий кубіт.	2	2	8
9	<i>Одноелектронний транспорт і кулонівська блокада.</i> Умови реалізації ефектів кулонівської блокади. Кулонівська блокада і кулонівські осциляції в тунельному контакті. Одноелектронний транзистор, “Coulomb diamonds”. Класичні і квантові точки, «спектроскопія рівнів».	2	2	8
10	Модульна контрольна робота		2	
	<b>ВСЬОГО</b>	<b>20</b>	<b>20</b>	<b>80</b>

**Загальний обсяг 120 год., в тому числі:**

Лекцій – 20 год.

Практичні заняття - 20 год.

Самостійна робота - 80 год.

## **9. Рекомендовані джерела:**

### ***Основна:***

- [1] S.Datta, Electronic transport in mesoscopic systems (CUP, 1999) – 393p.
- [2] Yu.V. Nazarov, Ya.M. Blanter, Quantum Transport - Introduction to Nanoscience (CUP, 2009) – 591p.

### ***Додаткова:***

- [1] Kouwenhoven, L.P., Schön, G., Sohn, L.L. (1997). Introduction to Mesoscopic Electron Transport. In: Sohn, L.L., Kouwenhoven, L.P., Schön, G. (eds) Mesoscopic Electron Transport. NATO ASI Series, vol 345. Springer, Dordrecht. [https://doi.org/10.1007/978-94-015-8839-3\\_1](https://doi.org/10.1007/978-94-015-8839-3_1)
- [2] Y.Imry, Introduction to Mesoscopic Physics (Mesoscopic Physics and Nanotechnology) (Oxford University Press, USA, 2<sup>nd</sup> edition 2008) - 252p.
- [3] W.E. Shanks, Persistent Currents in Normal Metal Rings // A Dissertation Presented to the Faculty of the Graduate School of Yale University in Candidacy for the Degree of Doctor of Philosophy, May 2011

## **10. Додаткові ресурси:**

- [1] Доступ до матеріалів курсу (слайди лекцій, література): в режимі самостійної реєстрації студентів в електронній навчальній системі Canvas:

<https://canvas.instructure.com/enroll/AHBPAL>