

# КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ ТАРАСА ШЕВЧЕНКА

Факультет радіофізики, електроніки та комп'ютерних систем

Кафедра квантової радіофізики та наноелектроніки

**«ЗАТВЕРДЖУЮ»**

Заступник декана з навчальної роботи

\_\_\_\_\_ Олексій НЕЧИПОРУК

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2022 року

## РОБОЧА ПРОГРАМА НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ

### Фізика поверхні

для студентів

рівень вищої освіти

другий

галузь знань

10 Природничі науки

спеціальність

105 Прикладна фізика та наноматеріали

освітня програма

Радіофізика та електроніка

вид дисципліни

вибіркова

Форма навчання

денна

Навчальний рік

2022/2023

Семестр

3

Кількість кредитів ECTS

3

Мова викладання

українська

Форма заключного контролю

залік

### Викладач:

Андрій ГОРЯЧКО, доктор фіз.-мат. наук, доцент кафедри квантової радіофізики та наноелектроніки

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

**Розробник:**

Андрій ГОРЯЧКО, доктор фіз.-мат. наук, доцент кафедри квантової радіофізики та наноелектроніки

**«ЗАТВЕРДЖЕНО»**

Завідувач кафедри квантової радіофізики  
та наноелектроніки

\_\_\_\_\_ Ганна КАРЛАШ

Протокол № \_\_ від « \_\_ » \_\_\_\_\_ 2021 р.

Схвалено науково-методичною комісією факультету радіофізики, електроніки та комп'ютерних систем

Протокол № \_\_ від « \_\_ » \_\_\_\_\_ 2022 р.

Голова науково-методичної комісії

Сергій РАДЧЕНКО

« \_\_ » \_\_\_\_\_ 2022 року.

## ВСТУП

**1. Мета дисципліни** — надати магістрам знання для вивчення дисциплін, де використовуються методи фізики поверхні, а також для роботи із сучасною науковою літературою, і не в останню чергу до можливої практичної діяльності в ролі технологів, конструкторів та інженерів в разі працевлаштування на підприємствах оборонного сектору України або на високотехнологічних виробництвах за кордоном.

### **2. Попередні вимоги до опанування або вибору навчальної дисципліни:**

Навчальна дисципліна «Фізика поверхні» базується на циклі дисциплін професійної та практичної підготовки бакалавра, а саме: “Загальна фізика”, “Фізика твердого тіла”, “Радіоелектроніка”, “Квантова механіка”, “Фізика конденсованого середовища”.

Попередні вимоги:

1. студент повинен знати: основні закони, рівняння та співвідношення курсу загальної фізики, курсу фізики твердого тіла, курсу квантової механіки, курсу коливальних і хвиль, курсу радіоелектроніки та теорії електричних кіл.

2. студент повинен вміти: будувати фізичні моделі твердого тіла та потоків частинок як в наближенні класичної фізики так і в межах квантової теорії, ідентифікувати найважливіші аспекти взаємодії їхньої взаємодії з поверхнею твердого тіла.

3. студент повинен знати: базові основи теорії електронних приладів, схем та сигналів, основи вакуумної техніки та базові основи комп’ютерних алгоритмів.

### **3. Анотація навчальної дисципліни:**

«Фізика поверхні» є дисципліною за вибором циклу підготовки магістрів в галузі радіофізики та електроніки. Вона необхідна для формування професійного світогляду фахівця з прикладної фізики, завершуючи логічну послідовність дисциплін: загальна фізика, фізика конденсованого середовища / фізика твердого тіла, фізика поверхні. Методи та концепції фізики поверхні широко використовуються у фундаментальних та прикладних дисциплінах в таких спеціалізованих галузях як фізична електроніка, нанофізика, мікро- та нано-електроніка, фотоніка, тощо — усі вони мають величезне прикладне значення в сучасному високотехнологічному виробництві приладів та продуктів як цивільного так і оборонного призначення.

### **4. Завдання (навчальні цілі):**

1. Надати основні відомості з курсу «Фізика поверхні», які складають важливу частину загально-наукової підготовки магістра за спеціальністю «Прикладна фізика та наноматеріали».

2. Надати основні знання з теорії взаємодії квантово-механічних частинок з поверхнею твердого тіла, продемонструвати зв’язок характеристик цієї взаємодії з параметрами структури та іншими фізичними характеристиками поверхні.

3. Навчити застосовувати одержані знання у професійній діяльності при проведенні наукових досліджень та розробок в науково-дослідних або конструкторських закладах, в галузях високих технологій, машинобудування, хімічної промисловості, оборонної промисловості та подвійного призначення.

4. Навчити ефективно застосовувати отримані знання для комунікації в бізнес середовищі та серед грантових агенцій про важливість інвестицій в наукове приладобудування для посилення конкурентоспроможності, інвестиційної привабливості та обороноздатності України.

Забезпечення досягнення компетентностей:

ЗК-1 Знання та розуміння предметної області та розуміння професійної діяльності

### 5. Результати навчання за дисципліною:

| 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   |   |  |  |
| <b>1</b>   | студент повинен <b>знати</b> :   | лекційні заняття з використанням персональних комп'ютерів та методик дистанційного навчання | письмові модульні контрольні роботи                                  | до 45                                      |
| 1.1  | Основні визначення: поверхні, поверхневих дефектів, структур, властивостей, характеристик (фізичних, хімічних, електронних, оптичних, магнітних), процесів (емісія, транспорт носіїв струму, контактні явища)  | лекційні заняття  | Залік, контрольні роботи, завдання для самостійної роботи            | До 9                                       |
| 1.2  | Основні фізичні закони, які описують поверхневі явища (електронної емісії, електропровідності, розсіяння носіїв, магнето-опору, адсорбції, десорбції, дифузії, а також хімічні реакції)  | лекційні заняття  | Залік, контрольні роботи, завдання для самостійної роботи            | До 10                                      |
| 1.3  | Основні фізичні моделі поверхневих процесів: адсорбції, реконструкції, емісії електронів, квантування електронних станів та каналів провідності, приповерхневого вигину енергетичних зон тощо  | лекційні заняття  | Залік, контрольні роботи, завдання для самостійної роботи            | До 9                                       |
| 1.4  | Базові підходи до постановки експериментів у фізиці поверхні   | лекційні заняття  | Залік, контрольні роботи, завдання для самостійної роботи            | До 8                                       |
| <b>2</b>   | студент повинен <b>вміти</b> :   | лекційні заняття з використанням персональних комп'ютерів та методик дистанційного навчання | письмові модульні контрольні роботи                                  | до 40                                      |
| 2.1  | Створювати алгоритми обробки експериментальних даних одержаних при дослідженні поверхні твердого тіла  | лекційні заняття  | контрольні роботи, завдання для самостійної роботи                   | До 8                                       |
| 2.2  | Здійснювати оціночні розрахунки основних поверхневих фізичних параметрів (питомий опір, поверхнева концентрація заряду, величина поверхневого вигину зон, густина струму термо-, фото-, авто-, вторинної та тунельної електронної емісії тощо)   | лекційні заняття  | контрольні роботи, завдання для самостійної роботи                   | До 8                                       |
| 2.3  | Правильно визначати область застосовності основних фізичних моделей та законів, що описують поверхневі явища та властивості поверхонь, чітко ідентифікувати основні фізичні наближення, що робляться при виведенні відповідних аналітичних співвідношень та властиві їм похибки/неточності | лекційні заняття  | контрольні роботи, завдання для самостійної роботи                   | До 8                                       |
| 2.4  | Ідентифікувати експериментальні методики необхідні для вимірювання основних характеристик поверхні, знаходити оптимальні застосування базових процесів на поверхні твердого тіла в практичних технологіях виробництва тонкоплівкових систем, електронних приладів та сенсорів              | лекційні заняття  | контрольні роботи, завдання для самостійної роботи                   | До 7                                       |
| <b>3</b>   | <b>комунікація</b> :   | лекційні заняття з використанням  | письмові модульні контрольні роботи                                  | до 5                                       |

|     |  |   |  |       |
|-----|--|---|--|-------|
|     |  | персональних комп'ютерів та методик дистанційного навчання                                  |  |       |
| 3.1 | Професійна комунікація можливостей дослідницької лабораторії щодо надання діагностичних послуг для представників підприємств високотехнологічних галузей виробництва | лекційні заняття  | контрольні роботи, завдання для самостійної роботи | До 3  |
| 3.2 | Навички роботи у великих дослідницьких колабораціях в галузі фізики поверхні, зокрема із використанням синхротронних джерел випромінювання                           | лекційні заняття  | контрольні роботи, завдання для самостійної роботи | До 2  |
| 4   | <b>автономність та відповідальність:</b>   | лекційні заняття з використанням персональних комп'ютерів та методик дистанційного навчання | письмові модульні контрольні роботи                | до 10 |
| 4.1 | Здатність до самостійного пошуку та роботи з джерелами наукової інформації, в т.ч. англійською мовою, за тематикою діагностики поверхні твердого тіла                | лекційні заняття  | контрольні роботи, завдання для самостійної роботи | До 5  |
| 4.2 | Експертна оцінка новизни запропонованих експериментальних досліджень та доцільності закупівель дороговартісного наукового вимірювального обладнання                  | лекційні заняття  | контрольні роботи, завдання для самостійної роботи | До 5  |

## 6. Співвідношення результатів навчання дисципліни із програмними результатами навчання

які не входять до блоків спеціалізації

| Результати навчання дисципліни  |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |  |
|---|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|--|
| Програмні результати навчання (назва)   | 1.1 | 1.2 | 1.3 | 1.4 | 2.1 | 2.2 | 2.3 | 2.4 | 3.1 | 3.2 | 4.1 | 4.2 |  |
| ПРН 1. Використовувати знання в галузі прикладної фізики, математики, електроніки та інформаційних технологій для виконання наукових досліджень, інженерно-технічних робіт на виробничих, науково-технічних, конструкторських, сервісних ділянках тощо            | +   | +   | +   | +   | +   | +   | +   | +   |     | +   | +   |     |  |
| ПРН 2. 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.  |     |     |     |     | +   |     | +   |     | +   | +   |     | +   |  |
| ПРН 3. Обговорювати та знаходити прогресивні та інноваційні рішення проблем і завдань при виконанні науково-технічних та виробничих проектів.   | +   | +   | +   |     | +   | +   |     | +   |     | +   | +   |     |  |
| ПРН 4. Встановлювати та аргументувати нові залежності між параметрами та характеристиками фізичних систем.  |     | +   | +   | +   |     |     | +   | +   | +   | +   | +   | +   |  |
| ПРН 6. Коректно формулювати висновки у вигляді умов, критеріїв, числових оцінок, перевіряти, апробувати та представляти їх у аудиторії різного фахового рівня, використовуючи сучасні методики наукової та технічної комунікації українською та іноземними мовами |     |     |     |     | +   | +   | +   | +   | +   |     | +   |     |  |

## 7. Схема формування оцінки

**7.1. Форми оцінювання студентів:** рівень досягнення всіх запланованих результатів навчання визначається за результатами написання письмових контрольних робіт, та презентації усних доповідей. Внесок результатів навчання у підсумкову оцінку, за умови їх опанування на належному рівні:

- результати навчання 1.1 – 1.4 [знання] – до 45 %;
- результат навчання 2.1 – 2.4 [вміння] – до 40%;
- результат навчання 3.1-3.2 [комунікація] – до 5%;
- результат навчання 4.1-4.2 [автономність та відповідальність] – до 10%;

Форми оцінювання студентів:

**семестрове оцінювання:** контроль здійснюється за таким принципом.

1. Контрольна робота з тем 1-8 (письмово): РН 1.1-3, РН 2.1, РН 3.1, РН 4.1 – 20 балів.
2. Контрольна робота з тем 8-15 (письмово): РН 1.4-6, РН 2.2-3, РН 3.2, РН 4.2 – 20 балів.
3. Доповідь студента на семінарі(усно): РН 1.1-6, РН 2.1-3, РН 3.1-2, РН 4.1-2 – 20 балів.

**підсумкове оцінювання (у формі заліку):** форма заліку – письмово-усна. Всього за залік можна отримати від 0 до 40 балів. Умовою досягнення позитивної оцінки за дисципліну є отримання не менш ніж 60 балів, при цьому, оцінка за залік не може бути меншою **15 балів**.

**умови допуску до заліку:** умовою допуску до заліку є отримання студентом сумарно не менше, ніж *критично-розрахунковий мінімум* за семестр – **30 балів**.

**7.2. Організація оцінювання;** (обов'язково зазначається порядок організації передбачених робочою навчальною програмою форм оцінювання із зазначенням орієнтованого графіку оцінювання):

*Оцінювання за формами контролю:*

| Семестрова робота             | Кількість балів |              |
|-------------------------------|-----------------|--------------|
|                               | Min. – балів    | Max. – балів |
| Модульна контрольна робота №1 | 10              | 20           |
| Доповідь на семінарі          | 10              | 20           |
| Модульна контрольна робота №2 | 10              | 20           |

*Орієнтований графік оцінювання:*

| Форма оцінювання              | Орієнтовний період для здійснення відповідної форми оцінювання |
|-------------------------------|--|
| Модульна контрольна робота №1 | березень   |
| Доповідь на семінарі          | квітень  |
| Модульна контрольна робота №2 | травень  |
| Залік                         | травень  |

*Розрахунок балів, які отримують при успішній здачі заліку:*

| Значення | Семестр | Залік | Підсумкова оцінка |
|----------|---------|-------|-------------------|
| Мінімум  | 30      | 30    | 60                |
| Максимум | 60      | 40    | 100               |

## 7.3. Шкала відповідності оцінок

| Оцінка (за національною шкалою) / National grade | Рівень досягнень, % / Marks, % |
|--|--------------------------------|
| <b>Відмінно</b> / Excellent                      | 90-100%                        |
| <b>Добре</b> / Good                              | 75-89%                         |
| <b>Задовільно</b> / Accepted                     | 60-74%                         |
| <b>Не задовільно</b> / Not accepted              | 0-59%                          |

## 8. Структура навчальної дисципліни. Тематичний план лекційних занять

| № з/п                       | Назва теми  | У тому числі - кількість годин |          |                   |
|-----------------------------|---|--------------------------------|----------|-------------------|
|                             |   | Лекції                         | Семінари | Самостійна робота |
| <b>Змістовний модуль №1</b> |   |                                |          |                   |
| 1                           | Вступ, предмет курсу та об'єкт вивчення, основні уявлення про поверхню твердого тіла: морфологія, фізичні, хімічні, оптичні та електронні характеристики.                     | 2                              | -        | 2                 |
| 2                           | Явище термоелектронної емісії з поверхні металу у вакуум. Енергія Фермі та робота виходу.   | 2                              | -        | 4                 |
| 3                           | Загальний вираз для густини струму емісії з поверхні, рівняння Річардсона-Дашмана. Вплив зовнішнього електричного поля на величину ефективної роботи виходу. Ефект Шоткі.     | 2                              | -        | 4                 |
| 4                           | Квантово-механічний розгляд енергетичного бар'єру на межі тверде тіло — вакуум. Явище автоелектронної емісії.   | 2                              | -        | 4                 |
| 5                           | Адсорбція чужорідних атомів на поверхні твердого тіла, їхній вплив на величину роботи виходу катодів сучасних вакуумних електронних приладів.                                 | 2                              | -        | 4                 |
| 6                           | Тунельна емісія електронів з поверхні твердого тіла у вакуум. Сканувальна тунельна мікроскопія та її можливості. Кристалічна структура поверхонь металів та напівпровідників. | 2                              | -        | 6                 |
| 7                           | Фотоелектронна емісія з поверхні твердого тіла у вакуум. Поняття про фотоелектронну спектроскопію. Сучасні практичні застосування фотокатодів.                                | 2                              | -        | 2                 |
| 8                           | Сканувальна електронна мікроскопія та електронна Оже-спектроскопія як сучасні методики дослідження поверхні.  | 2                              | -        | 4                 |
| <b>Змістовний модуль №2</b> |   |                                |          |                   |
| 9                           | Визначення поверхні. Види поверхонь: ідеальна, атомарно чиста, реальна. Експериментальні способи отримання атомарно чистої поверхні.  | 2                              | -        | 4                 |
| 10                          | Поверхневі тампівські й шоттківські стани. Їхня фізична природа. Поверхневі стани як причина виникнення приповерхневого вигину зон.   | 2                              | -        | 6                 |
| 11                          | Виникнення поверхневого бар'єру й подвійно зарядженого шару: випадок металу й напівпровідника. Подвійно заряджений шар у металі. Іонсорбція. Хемосорбція.                     | 2                              | -        | 2                 |
| 12                          | Шар Шоткі у напівпровіднику. Залежність значення поверхневого потенціалу від рівня  | 2                              | -        | 4                 |

|               |  |           |          |           |
|---------------|--|-----------|----------|-----------|
|               | легування. Межа Венца. Модель Маделунга в застосуванні до поверхні.  |           |          |           |
| 13            | Контактна різниця потенціалів для контакту метал-напівпровідник. Ефект Шотткі для контакту метал-напівпровідник.                                 | 2         | -        | 4         |
| 14            | Низьковимірні матеріали. Приповерхневі 2D області. Виведення залежності густини станів від енергії для 2D провідника.                            | 2         | -        | 6         |
| 15            | Загальні вирази для опору й провідності в моделі Ландауера-Датта-Лундстрома для довільного режиму провідності – від балістичного до дифузійного. | 2         | -        | 4         |
| <b>Всього</b> |  | <b>30</b> | <b>-</b> | <b>60</b> |

Загальний обсяг           **90** год., в тому числі:  
 Лекції                       **30** год.  
 Самостійна робота   **60** год.

## 9. Рекомендовані літературні джерела:

### Основні джерела:

1. D.P. Woodruff. Modern Techniques of Surface Science. – Cambridge University Press, 2016. – 492 pp.
2. M. Rocca, T.S. Rahman, L. Vattuone. Springer Handbook of Surface Science. – Springer Nature Switzerland AG, 2020. – 1260 pp.
3. H. Ibach, Physics of Surfaces and Interfaces, Springer, 2006.
4. В.А.Сминтина. Фізико-хімічні явища на поверхні твердих тіл. Одеса: Астропринт, 2009.
5. K.W. Kolasinski, Surface Science, Wiley, 2008.
6. J.I. Goldstein et al. Scanning Electron Microscopy and X-Ray Microanalysis. – Springer Science + Business Media LLC, 2018. – 550 pp.

### Додаткові джерела:

1. E. Meyer, R. Bennewitz, H.J. Hug. Scanning Probe Microscopy. – The Lab on a Tip. – Springer Nature Switzerland AG, 2021. – 322 pp.
2. H. Luth, Solid Surfaces, Interfaces and Thin Films, Springer, 2010.
3. U. Celano. Electrical Atomic Force Microscopy for Nanoelectronics. – Springer Nature Switzerland AG, 2019. – 408 pp.
4. P. Hawkes, J.C.H. Spence. Springer Handbook of Microscopy. – Springer Nature Switzerland AG, 2019. – 1543 pp.
5. В.І. Стріха, Г.І. Пека. Поверхневі та контактні явища в напівпровідниках. Київ: Либідь, 1992.