

КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ ТАРАСА ШЕВЧЕНКА

Факультет радіофізики, електроніки та комп'ютерних систем

Кафедра фізичної електроніки

«ЗАТВЕРДЖЕНО»

Заступник декана з навчальної роботи

_____ О. Ю. Нечипорук

« ____ » _____ 2021 року

Робоча програма навчальної дисципліни

Фізичні процеси на поверхні твердих тіл

галузь знань	10 «Природничі науки»
спеціальність	105 «Прикладна фізика та наноматеріали»
рівень вищої освіти	другий (магістерський)
освітня програма	«Прикладна фізика та наноматеріали»
вид дисципліни	вибіркова
Форма навчання	денна
Навчальний рік	2021/2022
Семестр	3
Кількість кредитів ECTS	5
Мова викладання	українська
Форма заключного контролю	іспит

Викладач: Стріха Максим Віталійович, д.ф.-м.н., професор, професор
кафедри фізичної електроніки

Пролонговано: на 20__/20__ н. р. _____ (_____ « ____ » _____ 20__ р.

на 20__/20__ н. р. _____ (_____) « ____ » _____ 20__ р.

КИЇВ 2021

Розробник: Стріха Максим Віталійович, д.ф.-м.н., професор, професор
кафедри фізичної електроніки

«ЗАТВЕРДЖЕНО»

Завідувач кафедри фізичної електроніки

_____ А.М. Веклич

Протокол № __ від « __ » _____ 2021р.

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

Протокол № __ від « __ » _____ 2021р.

Голова науково-методичної комісії

С. П. Радченко

« __ » _____ 2021 року.

Робоча програма навчальної дисципліни
Фізичні процеси на поверхні твердих тіл
(2 курс ОР Магістр, 3 семестр)

Лекцій	50 год.
Самостійна робота студента	100 год.
Модульні контрольні роботи	5
Форма заключного контролю	- іспит

1. Статус дисципліни. Навчальна дисципліна «Фізичні процеси на поверхні твердих тіл» є вибірковою дисципліною підготовки фахівців за освітнім рівнем «магістр» галузі знань «10 Природничі науки» зі спеціальності «105 Прикладна фізика та наноматеріали».

2. Анотація навчальної дисципліни. Курс «Фізичні процеси на поверхні твердих тіл» - необхідна складова формування професійного світогляду фахівця зі спеціальності «Прикладна фізика та наноматеріали». В ньому з єдиної точки зору розглядаються питання фізики приповерхневих процесів провідності, які лежать в основі роботи найпоширеніших пристроїв сучасної напівпровідникової електроніки – транзисторів метал-діелектрик-напівпровідник, де канал провідності реалізується в тонкій приповерхневій області. Особливу увагу звернуто на канали пониженої вимірності, які працюють у діапазоні нанодовжин, а також на прилади на основі графену та інших сучасних 2D матеріалів.

3. Метою навчальної дисципліни «Фізичні процеси на поверхні твердих тіл» є поглиблене вивчення найсучасніших підходів до опису основ роботи транзисторів метал-діелектрик-напівпровідник з приповерхневим каналом провідності нанодовжини та пониженої вимірності.

4 Результати навчання. У результаті вивчення дисципліни «Фізичні процеси на поверхні твердих тіл» :

Студент повинен знати:

основи фізики процесів у каналі транзистора метал-діелектрик напівпровідник на основі традиційних (кремній) та новітніх 2D матеріалів (графен, дихалькогеніди перехідних металів) у рамках традиційних та сучасних теоретичних підходів (модель термоелектронної емісії, модель віртуального витоку, транспортна модель Ландауера-Датта-Лундстрома).

Студент повинен вміти:

будувати та розраховувати характеристики приповерхневих провідних каналів, визначати фізичні параметри основних типів сучасних польових транзисторів за їх електрофізичними властивостями.

5. Передумови для вивчення навчальної дисципліни.

Навчальна дисципліна «Фізичні процеси на поверхні твердих тіл» має зв'язок з навчальними дисциплінами «Квантова та напівпровідникова

електроніка», «Фізика поверхні», «Фізика конденсованого середовища», які викладаються на факультеті радіофізики, електроніки та комп'ютерних систем на 4 курсі бакалаврської та 1 курсі магістерської підготовки.

6. Засоби оцінювання результатів навчання.

- **Семестрове оцінювання.** Навчальний курс містить два змістовні модулі, які оцінюються максимально в 20 балів.

- **Робота в аудиторії** є частиною відповідного модуля, доповіді на практичних заняттях, контрольні роботи та колоквиуми є складовими відповідних модулів.

- **Письмові контрольні роботи** проводяться після завершення відповідних тем.

- **Підсумкове оцінювання (у формі іспиту):** Завдання складається із 3-х теоретичних питань. Кожне питання оцінюється від 0 до 20 балів

7. Умови допуску до підсумкового іспиту: Умовою допуску до іспиту є отримання студентом протягом семестру (сумарно) не менше ніж 10 балів. Студенти, які сумарно протягом семестру набрали меншу кількість балів, для одержання допуску до іспиту повинні написати на необхідну мінімальну кількість балів додаткову контрольну роботу.

8. Критерії оцінювання: протягом семестру передбачено проведення двох модульних контрольних робіт. За першу та другу модульні контрольні роботи нараховується максимум по 15 балів. Максимальна кількість балів, яка може бути нарахована студенту протягом семестру - 40 балів.

Якщо студент з поважних причин був відсутній при написанні модульної контрольної роботи з лекційного матеріалу, він має право на одне перескладання з можливістю отримання максимальної кількості балів. Термін перескладання визначається викладачем.

Система контролю

Курс «Фізичні процеси на поверхні твердих тіл» складається з двох змістовних модулів (ЗМ-1 —ЗМ-2) у третьому семестрі магістерської підготовки. Навчальним планом на вивчення курсу відведено 5 кредитів (50 годин лекцій, 100 години СРС).

Контроль знань студентів здійснюється за модульно-рейтинговою системою. Передбачено 2 підсумкові модульні контролі (ПМК-1 — ПМК-2), та комплексний підсумковий модуль-іспит (КПМ).

Підсумкова оцінка (ПО) розраховується за накопичувальною системою

Максимальна кількість балів	Вид контролю			
	ПМК-1	ПМК-2	КПМ	ПО
за модульну контрольну роботу 1	15	-	60	100
за модульну контрольну роботу 2	-	15		
за питання та відповіді на лекції	5	5		
Всього	20	20	60	100

Примітка. Студенти, які за сумою двох модульних контролів набрали менше 10 балів, до іспиту не допускаються.

ШКАЛА ОЦІНЮВАННЯ

За шкалою Університету (100-	Оцінка за національною шкалою	Оцінка за шкалою ECTS
90-100	відмінно - 5	A - відмінно
85-89	добре - 4	B - добре (дуже добре)
75-84		C – добре
65-74	задовільно - 3	D - задовільно
60-64		E - задовільно (достатньо)
35-59	незадовільно - 2	FX - незадовільно з можливістю повторного
1-34	незадовільно - 2	F - незадовільно з обов'язковим повторним

Тематичний план курсу

Змістовний модуль 1

№	Назва теми та короткий зміст	Кількість годин			
		Всього	Лекції	Лабораторні	СРС
1	Вступ. Поверхня та приповерхневий шар зі зміненими щодо об'єму фізичними властивостями. Приповерхневий (приконтактний) вигин зон у напіпровіднику.		2		4
2	Узагальнена модель провідності електронів Ландауера-Датта-Лундстрома. Поняття коефіцієнта проходження і числа мод провідності. Формула Ландауера для провідності. Фермівське вікно провідності. Квантування провідності – теоретичне передбачення й експериментальне підтвердження. Балістична і дифузійна провідність 2D систем у моделі ЛДЛ. Поняття балістичної рухливості електронів.		8		16
3	Сучасний MOSFET – будова, назви терміналів, розміри, фізичні принципи функціонування, мініатюризація. Схема ввімкнення MOSFET. Вихідні та передавальні вольт-амперні характеристики. Основні метричні характеристики MOSFET. Енергетичні діаграми каналу провідності MOSFET. Поняття про віртуальний витік і область відтину каналу. Ефект зниження бар'єру, зумовлений витоком (DIBL).		6		12
4	Модель термоелектронної емісії для опису струму в MOSFET. Пояснення наявності лінійної області та області насичення в цій моделі. Струм через канал MOSFET у моделі віртуального витоку: формула для лінійної області вихідної ВАХ і для області насичення. Модель для струму насичення з залученням поняття про відтин каналу.		6		12
5	Формування інверсного каналу з електронною провідністю у MOSFET на		4		8

	основі кремнію р-типу. Розв'язання рівняння Пуассона-Больцмана. Критерії появи інверсного каналу провідності.				
	Контрольна робота				

Змістовний модуль 2

6	Напруга на затворі та поверхневий потенціал. Рухливий електронний заряд у масивній структурі MOS та в тонкій SOI. Двовимірна електростатика MOS та модель віртуального витоку.		6		12
7	Транспортна модель Ландауера-Датта-Лундстрома та балістичні MOSFET. Балістична швидкість інжектування в нанотранзисторах. Об'єднання балістичної моделі з моделлю віртуального витоку.		4		8
8	Розсіяння електронів та модель проходження каналу MOSFET. Об'єднання моделі проходження та моделі віртуального витоку. Фізика нанотранзисторів: фундаментальні обмеження.		6		12
9	Основи фізики графену: зонна структура, провідність та розсіяння носіїв. Польовий транзистор на основі графену: чому вуглецева електроніка не стала масовою.		4		8
10	Основи фізики графену: зонна структура, провідність та розсіяння носіїв. Польовий транзистор на основі графену: чому вуглецева електроніка не стала масовою.		4		8
	Контрольна робота				
	Загалом		50		150

Перелік рекомендованої літератури

1. Ю.О. Кругляк, М.В. Стріха. Фізика нанотранзисторів: устрій, метрика та керування // Сенсорна електроніка і мікросистемні технології. - 2018. – т. 15, №.4. – С.18-40.
2. Ю.О. Кругляк, М.В. Стріха. Фізика нанотранзисторів: теорія MOSFET в традиційному викладі, основи моделі віртуального витоку й наближення виснаження // Сенсорна електроніка і мікросистемні технології. - 2019. – т. 16, №.1. – С.7 -40.
3. Ю.О. Кругляк, М.В. Стріха. Фізика нанотранзисторів: поверхневий

потенціал, напруга на затворі та рухливий електричний заряд у масивній структурі MOS та в тонкій SOI // Сенсорна електроніка і мікросистемні технології. - 2019. – т. 16, №.2. – С.5 -31.

4. Ю.О. Кругляк, М.В. Стріха. Фізика нанотранзисторів: 2D електростатика MOS і модель віртуального витоку // Сенсорна електроніка і мікросистемні технології. - 2019. – т. 16, №.3. – С.19 -41.

5. Ю.О. Кругляк, М.В. Стріха. Фізика нанотранзисторів: транспортна модель Ландауера-Датта-Лундстрома та балістичні MOSFET // Сенсорна електроніка і мікросистемні технології. - 2019. – т. 16, №.4. – С.5 -26.

6. Ю.О. Кругляк, М.В. Стріха. Фізика нанотранзисторів: балістична швидкість впорскування та об'єднання балістичної моделі з моделлю віртуального витоку // Сенсорна електроніка і мікросистемні технології. - 2020. – т. 17, №.1. – С.4-20

7. Ю.О. Кругляк, М.В. Стріха. Фізика нанотранзисторів: розсіяння електронів і модель проходження MOSFET // Сенсорна електроніка і мікросистемні технології. - 2020. – т. 17, №.2. – С.16 -34.

8. Ю.О. Кругляк, М.В. Стріха. Узагальнена модель Ландауера-Датта-Лундстрома в застосуванні до транспортних явищ у графені // Український фізичний журнал. Огляди. – 2015. – т.10, №1. – С.3-32.

9. J. P. Colinge, C. A. Colinge. Physics of Semiconductor Devices. New York, Boston, Dordrecht, London, Moscow: Kluwer Academic Publishers. 2003. - 451 p. (Режим доступу: https://www.academia.edu/11705172/PHYSICS_OF_SEMICONDUCTOR_DEVICES_by_J_P_Colinge_and_C_A_Colinge?auto=download&email_work_card=download-paper).

10. Г.П.Пека. В.І.Стріха. Поверхневі та контактні явища у напівпровідниках // Київ: «Либідь», 1992. – 240 с.

11. Ю.О. Кругляк, М.В. Стріха. Фізика нанотранзисторів: об'єднання моделі проходження та моделі віртуального витоку – модель MVS-проходження // Сенсорна електроніка і мікросистемні технології. - 2020. – т. 17, №.4. – С.4 -22.

12. Ю.О. Кругляк, М.В. Стріха. Фізика MOSFET нанотранзисторів: фундаментальні границі і обмеження // Сенсорна електроніка і мікросистемні технології. - 2021. – т. 17, №.3. – С.4 -28.

ДОДАТКИ

I Завдання навчальної дисципліни (навчальні цілі):

Дисципліна спрямована на формування програмних компетентностей:

ЗК 2 Здатність зберігати та примножувати моральні, культурні, наукові цінності і досягнення суспільства на основі розуміння історії та закономірностей розвитку предметної області, її місця у загальній системі знань про природу і суспільство та у розвитку суспільства, техніки і технологій, використовувати різні види та форми рухової активності для активного відпочинку та ведення здорового способу життя;

ЗК 6 Навички використання інформаційних і комунікаційних технологій;

ЗК 10 Здатність до пошуку, оброблення та аналізу інформації з різних джерел;

ЗК 13 Здатність працювати автономно;

ФК 3 Здатність брати участь у проведенні експериментальних досліджень властивостей фізичної системи, фізичних явищ і процесів.

II Програмні результати навчання за дисципліною

ПРН 1 Розуміти предметну область сучасної прикладної фізики та математики;

ПРН 4 Знання іноземної мови;

ПРН 8 Знаходити прогресивні та інноваційні рішення проблем і завдань при виконанні науково-технічних проектів;

ПРН 15 Розробляти та формулювати свої професійні висновки та розумно їх аргументувати для фахової та нефахової аудиторії.