



# ТВЕРДОТІЛЬНА ЕЛЕКТРОНІКА

## Робоча програма навчальної дисципліни (Силабус)

### Реквізити навчальної дисципліни

Рівень вищої освіти	<i>Перший (бакалаврський)</i>
Галузь знань	<i>15 Автоматизація та приладобудування</i>
Спеціальність	<i>153 Мікро- та наносистемна техніка</i>
Освітня програма	<i>Електронні мікро- та наносистеми та технології</i>
Статус дисципліни	<i>Нормативна</i>
Форма навчання	<i>очна(денна)</i>
Рік підготовки, семестр	<i>2 курс, весняний семестр</i>
Обсяг дисципліни	<i>6 кредитів ЕКТС</i>
Семестровий контроль/ контрольні заходи	<i>Іспит / Модульні контрольні роботи, РР</i>
Розклад занять	<i>3 лекції, 1 практичне та 1 лабораторне заняття на 2 тижні згідно з <a href="http://www.roz.kpi.ua">http://www.roz.kpi.ua</a></i>
Мова викладання	<i>Українська</i>
Інформація про керівника курсу / викладачів	<i>Лектор: к.т.н., ст.викл. каф. МЕ Королевич Любомир Миколайович, <a href="mailto:l.korolevych-me@ill.kpi.ua">l.korolevych-me@ill.kpi.ua</a>, +38(066)987-06-10 Практичні заняття: проф., к.т.н, проф. каф. МЕ Борисов Олександр Васильович, <a href="mailto:o.borysov-me@ill.kpi.ua">o.borysov-me@ill.kpi.ua</a>, +38(091)308-40-09 Лабораторні заняття: к.т.н., ст.викл. каф. МЕ Королевич Любомир Миколайович, <a href="mailto:l.korolevych-me@ill.kpi.ua">l.korolevych-me@ill.kpi.ua</a>, +38(066)987-06-10</i>
Розміщення курсу	Google клас: kv7pybv Онлайн-заняття: <a href="https://meet.google.com/lookup/e6cdugbah5">https://meet.google.com/lookup/e6cdugbah5</a>

### Програма навчальної дисципліни

#### 1. Опис навчальної дисципліни, її мета, предмет вивчення та результати навчання

У межах навчальної дисципліни «Твердотільна електроніка» вивчаються фізичні основи роботи напівпровідникових приладів, їх властивості, параметри і характеристики.

Необхідність вивчення цієї дисципліни обумовлено тим, що вона дає майбутньому фахівцю знання про сучасний стан твердотільної електроніки і є базою для вивчення інших дисциплін за спеціальністю мікро- та наносистемна техніка.

**Метою** дисципліни «Твердотільна електроніка» є формування у студентів здатностей: використовувати одержанні знання і уміння при вивченні наступних дисциплін та у практичній діяльності фахівця з проектування, виготовлення, дослідження та експлуатації напівпровідникових приладів.

Вивчення даної дисципліни допоможе майбутньому фахівцю на підставі знань фізичних процесів ідентифікувати, класифікувати, оцінювати технічні можливості напівпровідникових приладів і вирішувати інженерні задачі, пов'язані з розробкою і експлуатацією електронних виробів.

Вивчення даної дисципліни забезпечить студентів наступними

**загальними компетенціями:**

ЗК1. Здатність застосовувати знання у практичних ситуаціях.

ЗК2. Знання та розуміння предметної області та розуміння професійної діяльності.

ЗК6. Здатність вчитися і оволодівати сучасними знаннями.

ЗК7. Здатність до пошуку, оброблення та аналізу інформації з різних джерел.

**та фаховими компетенціями:**

ФК1. Здатність використовувати знання і розуміння наукових фактів, концепцій, теорій, принципів і методів для проектування та застосування мікро- та наносистемної техніки.

ФК3. Здатність використовувати математичні принципи і методи для проектування та застосування мікро- та наносистемної техніки.

ФК5. Здатність ідентифікувати, класифікувати, оцінювати і описувати процеси у мікро- та наносистемній техніці за допомогою побудови і аналізу їх фізичних і математичних моделей.

ФК6. Здатність застосовувати творчий та інноваційний потенціал в синтезі інженерних рішень і в розробці конструктивних елементів геліоенергетики, приладів фізичного та біомедичного призначення.

ФК8. Здатність визначати та оцінювати характеристики та параметри матеріалів мікро- та наносистемної техніки, аналогових та цифрових електронних пристроїв, мікропроцесорних систем.

Після засвоєння дисципліни «Твердотільна електроніка» студенти мають продемонструвати такі **програмні результати навчання:**

ПРН1. Застосовувати знання принципів дії пристроїв і систем мікро- та наносистемної техніки при їхньому проектуванні та експлуатації.

ПРН2. Застосовувати знання і розуміння математичних методів для розв'язання теоретичних і прикладних задач мікро- та наносистемної техніки.

ПРН4. Оцінювати характеристики та параметри матеріалів пристроїв мікро- та наносистемної техніки, знати та розуміти основи твердотільної та оптичної електроніки, наноелектроніки, електротехніки, аналогової та цифрової схемотехніки, мікропроцесорної техніки.

ПРН6. Застосовувати навички планування та проведення експерименту для перевірки гіпотез та дослідження явищ мікро- та наноелектроніки, вміти використовувати стандартне обладнання, складати схеми пристроїв, аналізувати, моделювати та критично оцінювати отримані результати.

ПРН7. Досліджувати характеристики і параметри мікро- та наносистемної техніки, приладів фізичної та біомедичної електроніки з урахуванням цілей дослідження, вимог та специфіки вибраних технічних засобів.

ПРН9. Проектувати пристрої мікро- та наносистемної техніки у відповідності до вимог замовника і наявних ресурсних обмежень.

ПРН10. Розробляти технічні засоби діагностування технічного стану мікро- та наносистемної техніки, приладів фізичної та біомедичної електроніки.

ПРН14. Вміти засвоювати нові знання, прогресивні технології та інновації, знаходити нові нешаблонні рішення і засоби їх здійснення.

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

Для успішного вивчення даної дисципліни студенти мають засвоїти наступні дисципліни (**пререквізити**):

ЗО12. Математичний аналіз

ПО1. Вступ до техніки вимірювань

ПО2. Матеріали і компоненти мікро- та наносистемної техніки

Результати навчання даної дисципліни використовуються для вивчення наступних дисциплін (*постреквізити дисципліни*):

ПО16. Основи технології мікро- та наносистемної техніки

### 3. Зміст навчальної дисципліни

**Розділ 1. Загальні відомості з фізики твердого тіла.**

**Розділ 2. Електричні переходи між напівпровідниками.**

2.1. P-n перехід в рівноважному стані.

2.2. P-n перехід в нерівноважному стані.

**Розділ 3. Напівпровідникові діоди.**

3.1. Низькочастотні напівпровідникові діоди.

3.2. Надвисокочастотні напівпровідникові діоди.

**Розділ 4. Біполярні транзистори.**

4.1. Класифікація і умовне позначення транзисторів. Принцип дії транзистора.

4.2. Схеми вмикання транзистора. ВАХ транзистора.

4.3. Параметри транзистора.

4.4. Частотні властивості транзистора.

**Розділ 5. Тиристори.**

**Розділ 6. Пільові транзистори.**

6.1. Прилади з структурою метал-напівпровідник.

6.2. Пільові транзистори.

**Розділ 7. Оптиелектронні прилади.**

### 4. Навчальні матеріали та ресурси

Базова література, рекомендована для опанування дисципліни:

1. Борисов О. В., Якименко Ю. І. Твердотільна електроніка. Підручник. Київ: НТУУ «КПІ», 2015. 484 с.

Режим доступу: [https://me.kpi.ua/downloads/Borysov\\_Yakymenko\\_TTE\\_2015.pdf](https://me.kpi.ua/downloads/Borysov_Yakymenko_TTE_2015.pdf)

2. Дружинін А.О., Твердотільна електроніка. Фізичні основи і властивості напівпровідникових приладів. Навчальний посібник. – Львів: Видавн. Національного університету «Львівська політехніка», 2009. – 332 с .

Допоміжна література, яку потрібно прочитати або використовувати для опанування дисципліни:

1. Борисов О. В., Волхова Т. Л., Королевич Л. М. Твердотільна електроніка. Пробій в колекторному переході бездрейфового транзистора [Електронний ресурс]: навчальний посібник. Київ : НТУУ «КПІ», 2015. 109 с.

Режим доступу: <http://ela.kpi.ua/handle/123456789/13844>

2. Борисов О. В., Волхова Т. Л., Королевич Л. М. Твердотільна електроніка: практикум. Київ: НТУУ «КПІ», 2018. 105 с.

Режим доступу: <http://ela.kpi.ua/handle/123456789/24896>

## Навчальний контент

### 5. Методика опанування навчальної дисципліни (освітнього компонента)

Теоретичний матеріал дисципліни викладається на лекціях. Цей матеріал є основою для опанування дисципліни. Для більш глибокого вивчення дисципліни студентом рекомендована базова і допоміжна навчальна і наукова література. На практичних і лабораторних заняттях студенти самостійно навчаються розв'язувати задачі з кожного розділу дисципліни, користуватися вимірювальними приладами, вимірювати параметри і характеристики приладів, робити висновки за результатами вимірювань.

## Лекційні заняття

### **Розділ 1. Загальні відомості з фізики твердого тіла**

1. Мета та завдання курсу «Твердотільна електроніка». Рейтингова система курсу. Місце курсу в процесі підготовки фахівців. Історія розвитку тведотільної електроніки. Рекомендована література.
2. Електропровідність напівпровідників. Залежність ел. провідності від температури. Зонна модель напівпровідників. Поняття рівня Фермі. Закон діючих мас.

### **Розділ 2. Електричні переходи між напівпровідниками**

3. Фізичні явища при утворенні  $p-n$  переходу. Утворення не скомпенсованого заряду на межі  $p$  і  $n$  напівпровідників. Потенціальний бар'єр, дифузійне електричне поле.
4. Зонна модель  $p-n$  переходу. Електричний струм через  $p-n$  перехід в рівноважному стані. Зміщення переходу в прямому в прямому і зворотному напрямку. Струм через  $p-n$  перехід в нерівноважному стані.
5. Аналіз  $p-n$  переходу в нерівноважному стані. Висота потенціального бар'єру і ширина  $p-n$  переходу.
6. Вольт-амперна характеристика ідеалізованого  $p-n$  переходу.
7. Вольт-амперна характеристика реального  $p-n$  переходу.
8. Пробій  $p-n$  переходу. Параметри  $p-n$  переходу: опір і ємність.
9.  $P-n$  перехід на малому змінному сигналі. Малосигнальна схема зміщення.
10.  $P-n$  перехід на високому рівні інжекції.

### **Розділ 3. Напівпровідникові діоди**

11. Класифікація і умовні позначення напівпровідникових діодів. Випрямні напівпровідникові діоди.
12. Імпульсні діоди. Перемикання діодів з прямого вмикання на зворотне. Проходження імпульсів прямого струму через діод. Параметри діодів, галузі застосування. Діоди з накопиченням заряду.
13. Напівпровідникові стабілітрони, параметри та галузі застосування. Варикапи. Параметри варикапів, галузі застосування. Врахування впливу термогенерації в  $p-n$  переході, процесів на поверхні переходу та явищ пробою в переході.
14. Тунельні діоди. ВАХ діода; параметри діода. Частотні властивості діода. Обернений тунельний діод.
15. Діоди НВЧ. Рух носіїв в напівпровідниках в великих електричних полях. Лавинно-прольотні діоди: принцип дії, параметри, галузі застосування. Діоди Ганна: принцип дії, параметри, галузі застосування.

### **Розділ 4. Біполярні транзистори.**

16. Класифікація і умовні позначення транзисторів. Структура біполярного транзистора. Режими роботи транзистора. Фізичні процеси в транзисторі в активному режимі. Співвідношення між струмами в транзисторі.
17. Три схеми вмикання транзистора: загальна характеристика схеми вмикання. ВАХ ідеалізованої моделі транзистора. Співвідношення Молла-Еберса.
18. ВАХ реального транзистора для схеми з загальною базою і з загальним емітером.
19. Внутрішні (фізичні) параметри транзистора. Залежність параметрів від режиму роботи і від температури.
20. Зовнішні параметри транзистора (параметри чотирьохполюсника). Системи параметрів. Зв'язок між системами параметрів. Еквівалентні схеми транзистора.
21. Залежність коефіцієнтів підсилення по струму від частоти в схемах з загальною базою і загальним емітером. Методи підвищення частотних властивостей транзистора.
22. Внутрішнє електричне поле в базі транзистора. Час прольоту носіїв бази. Розподіл носіїв в базі. Характеристика дрейфових і бездрейфових транзисторів.

### **Розділ 5. Тиристори**

23. Структура некерованого тиристора. Фізичні процеси в диністорі. ВАХ і параметри диністора. Керовані тиристори. Галузі застосувань.

### **Розділ 6. Уніполярні прилади**

24. Контакт метал-напівпровідник. Зонна діаграма контакту. Бар'єри Шоттки. Транзистор з бар'єром Шоттки.

25. Структура і принцип роботи транзистора з керуючим *p-n* переходом. ВАХ і параметри транзистора. Частотні властивості.

26. Польові транзистори з МДП структурою. Принцип роботи, параметри, характеристики. Галузі застосування польових транзисторів.

### **Розділ 7. Оптоелектронні прилади**

27. Випромінювана рекомбінація носіїв. Структура світлодіодів; параметри, характеристики, галузі застосування.

### **Лабораторні роботи**

№ заняття	Розділ	Тема заняття	Зміст роботи
1	3	Дослідження випрямляючих напівпровідникових діодів	Теоретичне вивчення і експериментальне дослідження випрямляючих властивостей германієвих та кремнієвих діодів, визначення фізичних параметрів діодів по їх вольт-амперних характеристиках.
2	3	Дослідження напівпровідникових стабілітронів	Теоретичне вивчення і експериментальне дослідження електричного пробою електронно-діркового переходу; дослідження характеристик та параметрів напівпровідникових стабілітронів.
3	3	Дослідження імпульсних властивостей <i>p-n</i> переходів	Теоретичне вивчення процесів, які обумовлюють інерційність <i>p-n</i> переходів і експериментальне дослідження перехідних характеристик напівпровідникових діодів.
4	3	Дослідження варикапів	Вивчення фізичних основ роботи варикапів, експериментальні дослідження характеристик і параметри варикапів.
5	3	Дослідження тунельних діодів	Вивчення фізичних принципів роботи та експериментальне дослідження вольт-амперних характеристик і параметрів тунельних діодів та їх залежність від температури.
6	4	Дослідження статичних вольт-амперних характеристик біполярного транзистора	Теоретичне вивчення залежностей між струмами та напругами в біполярному транзисторі, дослідження вольт-амперних характеристик у схемах із загальною базою і загальним емітером.
7	4	Дослідження частотних властивостей транзистора	Теоретичне вивчення факторів, які впливають на частотні властивості транзистора; експериментальне дослідження частотної залежності коефіцієнта підсилення за струмом в схемі із загальною базою і загальним емітером.
7	5	Дослідження тиристорів	Вивчення принципу роботи тиристора, експериментальне дослідження вольт-амперних

			характеристик, визначення параметрів і залежності їх від температури.
9	6	Дослідження польових транзисторів з керуючим <i>p-n</i> переходом	Теоретичне вивчення принципу роботи та експериментальне дослідження вольт-амперних характеристик і параметрів польового транзистора з керуючим <i>p-n</i> переходом.

### Практичні заняття

№ заняття	Розділ	Тема та зміст заняття
1	1	Зонна діаграма напівпровідника. Питома провідність. Співвідношення Ейнштейна. Рішення задач.
2	2	Висота потенціального бар'єру, його ширина і зонна діаграма <i>p-n</i> переходу в рівноважному стані. Рішення задач.
3	2	Висота потенціального бар'єру, його ширина і зонна діаграма <i>p-n</i> переходу в нерівноважному стані. Рішення задач.
4	2	Параметри <i>p-n</i> переходу для побудови ВАХ ідеалізованого <i>p-n</i> переходу. Рішення задач.
5	3	ВАХ реального <i>p-n</i> переходу з урахуванням напруги стабілізації стабілітронів. Рішення задач.
6	4	Практичні параметри біполярного транзистора ( <i>h</i> -параметри та ін.). Рішення задач.
7-8	4-5	Схеми включення біполярного транзистора та його ВАХ. Рішення задач.
9	6	МДН-транзистор з індукованим каналом. Порогова напруга МДН-транзистора. Рішення задач.

### 6. Самостійна робота студента/аспіранта

Розділ	Назва теми	К-ть годин
2	1. Вплив рівня інжекції в <i>p-n</i> переході на його характеристики	10
	2. Плавний <i>p-n</i> перехід та його особливості у порівняння зі східчастим	10
3	3. Стабістори	10
	4. Резонансно-тунельний діод	10
4	5. <i>h</i> -параметри біполярного транзистора	10
	6. Пробій колекторного <i>p-n</i> переходу біполярного транзистора	10
5	7. Високочастотні характеристики тиристорів	10
6	8. Бар'єр Шоттки. Зонна діаграма бар'єру Шоттки	10
7	9. Напівпровідникові лазери та сонячні батареї	10
<b>Всього годин</b>		<b>90</b>

### Політика та контроль

#### 7. Політика навчальної дисципліни (освітнього компонента)

Лекційні, лабораторні та практичні заняття проводяться в системі Google Classroom або очно (відповідно до положення КПІ ім. Ігоря Сікорського). Відвідування усіх видів занять є обов'язковим. Пропущені лабораторні заняття повинні бути відпрацьовані до закінчення семестру. Час відпрацювання

має бути узгоджено між студентом та викладачем з лабораторних робіт. Відпрацювання проводиться за згоди викладача з лекційних занять, куратором і деканом факультету.

Звіти з лабораторних та практичних робіт та РР оформлюються відповідно до вимог ДСТУ-3008 «Інформація та документація. Звіти у сфері науки і техніки. Структура і правила оформлення», як від руки так і на комп'ютері та друкуються (пишуться) на одному боці аркуша А4 білого кольору. У разі оформлення звіту від руки – графіки мають бути наведені на міліметрівці.

Для допуску до вимірювання **лабораторної роботи** необхідно попередньо ознайомитися з інструкціями та відповісти на 1-2 питання, пов'язаних або з вимірювальним стендом, або з принципом роботи відповідного приладу. Захист лабораторних робіт проводиться в межах звіту. На оформлення звіту і виконання завдань по лабораторній роботі дається 2 тижні. Звіт обов'язково має містити листок вимірів з підписом викладача, або його копію. У разі виявлення ознак недоброчесності в звіті з лабораторної роботи, бали за її виконання анулюються, або студенту за його бажанням надається завдання за темою лабораторної роботи.

На **практичних заняттях** буде проводитися розв'язання задач з курсу, в кінці якого буде задано індивідуальне експрес-завдання. Студент має змогу отримати рейтингові бали за розв'язання експрес-задач та за активну участь на занятті, як то прояв ініціативності під час розгляду завдання та виведення формул, відповіді на питання, виступ біля дошки тощо.

Перед першим та другим календарним контролем проводитимуться **модульні контрольні роботи**, які складаються з письмової роботи та усного опитування на лекціях. Питання винесені на модульній контрольній роботі будуть в межах пройденого на аудиторних (онлайн) заняттях матеріалу.

**Розрахункова робота (РР)** – індивідуальне завдання, яке складається з 6-8 частин, завдання на які будуть видаватися поступово впродовж семестру після практичних занять в системі Google Classroom. На виконання кожної частини розрахункової роботи виділяється 2 тижні. За кожну невчасно здану частину РР кількість зазначених рейтингових балів зменшується на 1. В кінці семестру всі частини РР об'єднуються у один цілісний звіт. Слід зауважити, що завдання засновані на ланцюговому принципі, тобто щоб вирішити кожне наступне завдання правильно, треба бути впевненим, що всі попередні завдання вирішені правильно.

Для допуску до **іспиту та перескладань** необхідно здати всі лабораторні та практичні роботи та РР, одночасно отримавши не нижче 40% семестрового рейтингу.

Підсумкова оцінка визначається згідно з табл.2, де підсумкова кількість балів за семестр  $R$  формується на підставі балів отриманих впродовж семестру  $R_1$  (50%) та балів отриманих на іспиті  $R_2$  (50%), тобто:

$$R = R_1 \cdot 0,5 + R_2,$$

де  $R_1$  визначається згідно з РСО (табл. 1) і максимум складає 100 балів, а  $R_2$  – визначається за результатами екзамену і максимум складає 50 балів.

**Академічна доброчесність.** Політика та принципи академічної доброчесності визначені у розділі 3 Кодексу честі Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». Детальніше: <https://kpi.ua/code>.

**Норми етичної поведінки.** Норми етичної поведінки студентів і співробітників визначені розділом 2 Кодексу честі Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». Детальніше: <https://kpi.ua/code>.

## 8. Види контролю та рейтингова система оцінювання результатів навчання (PCO)

**Поточний контроль:** виконання практичних робіт, РР та захист лабораторних робіт.

**Календарний контроль:** проводиться двічі на семестр, як правило на 7-8 та 14-15 тижнях, для отримання позитивного результату семестрового контролю необхідно на час проведення календарного контролю мати не менше 50% можливого на цей час рейтингу (близько 15-20 балів для I КК, та 35-40 балів для II КК)

**Семестровий контроль:** екзамен.

**Умови допуску до семестрового контролю:** виконання всіх лабораторних і практичних робіт, РР та отримання не нижче 40% семестрового рейтингу.

1. Система рейтингової оцінки по видам занять:

№ з/п	Заняття, що підлягають рейтинговій оцінці	Загальна кількість завдань	Максимальний бал за 1 завдання	Кількість балів на "відмінно"
1	МКР	2	25	50
2	РР	1	20	20
3	Лабораторні роботи	5	4	20
4	Практичні роботи	10	1	10
<b>Усього за семестр</b>				<b>100</b>

2. Таблиця відповідності підсумкових рейтингових балів  $R$  оцінкам за університетською шкалою:

Кількість балів $R$	Оцінка
100-95	Відмінно
94-85	Дуже добре
84-75	Добре
74-65	Задовільно
64-60	Достатньо
Менше 60	Незадовільно
Не виконані умови допуску	Не допущено

3. Якщо з об'єктивних обставин кількість завдань змінюється, семестрові бали, наведені у п. 1, відповідним чином корегуються.

#### 9. Додаткова інформація з дисципліни (освітнього компонента)

У випадку дистанційної форми навчання за рішенням кафедри екзаменаційна оцінка може бути виставлена «автоматом» за формулою шляхом перерахунку стартових балів за 100-бальною шкалою:

$$R = 60 + \frac{40(R_! - R_{\#})}{R_{\$} - R_{\#}}$$

де  $R_!$  – сума балів набрана студентом протягом семестру,  $R_{\#} = 40$  – бал необхідний для отримання допуску до семестрового контролю,  $R_{\$} = 100$  максимальна сума балів, передбачених РСО.

Яка переводиться до екзаменаційної оцінки згідно з табл. 2.

#### Робочу програму навчальної дисципліни (силабус):

**Складено** професор, кандидат технічних наук, професор Борисов Олександр Васильович,  
кандидат технічних наук, асистент Королевич Любомир Миколайович

**Ухвалено** кафедрою мікроелектроніки ФЕЛ (протокол № 22 від 23.06.2023 р.)

**Погоджено** Методичною комісією факультету електроніки (протокол № 06/23 від 29.06.2023 р.)