



# 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>3 курс, осінній семестр; 2 курс, весняний семестр</i>
Обсяг дисципліни	<i>6 кредитів ЕКТС</i>
Семестровий контроль/ контрольні заходи	<i>Іспит / Модульні контрольні роботи, РГР</i>
Розклад занять	<i>rozklad.kpi.ua</i>
Мова викладання	<i>Українська</i>
Інформація про керівника курсу / викладачів	Лектор: <i>к.т.н, проф. Борисов Олександр Васильович, o.borysov-me@ill.kpi.ua., +38(091)308-40-09</i> Практичні: <i>асист., Королевич Любомир Миколайович, l.korolevych-me@ill.kpi.ua, +38(066)987-06-10</i> Лабораторні: <i>асист., Королевич Любомир Миколайович, l.korolevych-me@ill.kpi.ua, +38(066)987-06-10</i>
Розміщення курсу	<i>Google клас: 3rg4olu</i>

### 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.

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

**знання:** фізичних властивостей напівпровідників; принципів роботи напівпровідникових приладів; параметрів і характеристик напівпровідникових приладів і їх залежності від зовнішніх факторів; області застосування приладів твердотільної електроніки.

**уміння:** використовувати знання, одержанні з попередніх дисциплін, для виводу аналітичних співвідношень опису приладів напівпровідникової електроніки, знаходити оптимальне рішення з вибору приладів для практичного використання в електронних пристроях.

**досвід:** вимірювання параметрів і характеристик напівпровідникових приладів і оцінювання результатів вимірювань, розроблення теоретичних моделей приладів.

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

Дисципліна «Твердотільна електроніка» забезпечується навчальними дисциплінами «Математика», «Фізика твердого тіла», «Фізика напівпровідників», «Матеріали і компоненти електронної техніки», «Статистична фізика», «Квантова механіка» і є базовою для вивчення дисциплін «Проектування та конструювання напівпровідникових приладів та інтегральних мікросхем», «Мікросхемотехніка», «Функціональна електроніка».

## **3. Зміст навчальної дисципліни**

- Розділ 1. *Загальні відомості з фізики твердого тіла*
- Розділ 2. *Електричні переходи між напівпровідниками*
- Розділ 3. *Напівпровідникові діоди.*
- Розділ 4. *Біполярні транзистори.*
- Розділ 5. *Тиристори.*
- Розділ 6. *Польові транзистори.*
- Розділ 7. *Оптоелектронні 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. Пасынков В.В., Чиркин Л.К. Полупроводниковые приборы. СПб.: Лань, 2002. 480 с.
3. 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. Гусев В.А. Основы твердотельной электроники. Севастополь: Изд-во Сев. НТУ, 2004. 635 с.
2. Тугов И.М., Глебов Б.А., Чарыков Н.А. Полупроводниковые приборы М: Энергоатомиздат, 1990. – 576 с.
3. 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>
4. Борисов О. В., Волхова Т. Л., Королевич Л. М. Твердотельная электроника: вопросы и ответы. Київ : НТУУ «КПІ», 2014. 188 с.  
Режим доступу: <http://ela.kpi.ua/handle/123456789/13847>
5. 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>
6. Зи С. М. Физика полупроводниковых приборов. Книга 1. Москва: Мир, 1984. 456 с.
7. Зи С. М. Физика полупроводниковых приборов. Книга 2. Москва: Мир, 1984. 456 с.

## 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

Тема курсу	Зміст лекції
------------	--------------

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

1.1. Предмет курсу «Напівпровідникова електроніка»	1. Мета та завдання курсу «Напівпровідникова електроніка». Рейтингова система курсу. Місце курсу в процесі підготовки фахівців. Історія розвитку напівпровідникової електроніки. Рейтингова система курсу. Рекомендована література.
1.2. Основні поняття і терміни з фізики напівпровідників	2. Електропровідність напівпровідників. Залежність ел. провідності від температури. Зонна модель напівпровідників. Поняття рівня Фермі. Закон діючих мас.

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

2.1. <i>P-n</i> перехід в рівноважному стані	3. Фізичні явища при утворенні <i>p-n</i> переходу. Утворення не скомпенсованого заряду на межі <i>p</i> і <i>n</i> напівпровідників. Потенціальний бар'єр, дифузійне електричне поле. 4. Зонна модель <i>p-n</i> переходу. Електричний струм через <i>p-n</i> перехід в рівноважному стані. Зміщення переходу в прямому в прямому і зворотному напрямку. Струм через <i>p-n</i> перехід в нерівноважному стані.
2.2. <i>P-n</i> перехід в нерівноважному стані	5. Аналіз <i>p-n</i> переходу в нерівноважному стані. Висота потенціального бар'єру і ширина <i>p-n</i> переходу. 6. Вольт-амперна характеристика ідеалізованого <i>p-n</i> переходу. 7. Вольт-амперна характеристика реального <i>p-n</i> переходу. 8. Пробій <i>p-n</i> переходу. 9. Параметри <i>p-n</i> переходу: опір і ємність. 10. <i>P-n</i> перехід на малому змінному сигналі. Малосигнальна схема зміщення. 11. <i>P-n</i> перехід на високому рівні інжекції.

#### *Розділ 3. Напівпровідникові діоди*

3.1. Низькочастотні напівпровідникові діоди	12. Класифікація і умовні позначення напівпровідникових діодів. Випрямні напівпровідникові діоди. 13. Імпульсні діоди. Перемикання діодів з прямого вмикання на зворотне. Проходження імпульсів прямого струму через діод. Параметри діодів, галузі застосування. Діоди з накопиченням заряду. 14. Напівпровідникові стабілітрони, параметри та галузі застосування. Варикапи. Параметри варикапів, галузі застосування. Облік впливу термогенерації в <i>p-n</i> переході, процесів на поверхні переходу та явищ пробою в переході.
---	--

3.2. Надвисокочастотні напівпровідникові діоди	15. Тунельні діоди. ВАХ діода; параметри діода. Частотні властивості діода. Обернений тунельний діод. 16. 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.***

4.1. Класифікація і умовне позначення транзисторів. Принцип дії транзистора.	17. Класифікація і умовні позначення транзисторів. Структура біполярного транзистора. Режими роботи транзистора. 18. Фізичні процеси в транзисторі в активному режимі. Співвідношення між струмами в транзисторі.
4.2. Схеми вмикання транзистора. ВАХ транзистора.	19. Три схеми вмикання транзистора: загальна характеристика схеми вмикання. ВАХ ідеалізованої моделі транзистора. Співвідношення Молла-Еберса. 20. ВАХ реального транзистора для схеми з загальною базою і з загальним емітером.
4.3. Параметри транзистора	21. Внутрішні (фізичні) параметри транзистора. Залежність параметрів від режиму роботи і від температури. 22. Зовнішні параметри транзистора (параметри чотирьохполюсника). Системи параметрів. Зв'язок між системами параметрів. Еквівалентні схеми транзистора.
4.4. Частотні властивості транзистора	23. Залежність коефіцієнтів підсилення по струму від частоти в схемах з загальною базою і загальним емітером. Методи підвищення частотних властивостей транзистора. 24. Внутрішнє електричне поле в базі транзистора. Час прольоту носіїв базі. Розподіл носіїв в базі. Характеристика дрейфових і бездрейфових транзисторів.

#### ***Розділ 5. Тиристоры***

5.1. Принцип роботи тиристора	25. Структура некерованого тиристора. Фізичні процеси в диністорі. ВАХ і параметри диністора. Керовані тиристоры. Галузі застосувань.
-------------------------------	---

#### ***Розділ 6. Уніполярні прилади***

6.1. Прилади з структурою метал-напівпровідник	26. Контакт метал-напівпровідник. Зонна діаграма контакту. Бар'єри Шоттки. Транзистор з бар'єром Шоттки.
6.2. Польові транзистори	27. Структура і принцип роботи транзистора з керуючим <i>p-n</i> переходом. ВАХ і параметри транзистора. Частотні властивості. 28. Польові транзистори з МДП структурою. Принцип роботи, параметри, характеристики. Галузі застосування польових транзисторів.

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

7.1. Оптоелектронні прилади	29. 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 $p-n$ переходів	Теоретичне вивчення процесів, які обумовлюють інерційність $p-n$ 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 $p-n$ переходом	Теоретичне вивчення принципу роботи та експериментальне дослідження вольт-амперних характеристик і параметрів польового транзистора з керуючим $p-n$ переходом.

### Практичні заняття

№ заняття	Р.	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 $p-n$ переходу в рівноважному стані. Рішення задач.
3	2	Висота потенціального бар'єру, його ширина і зонна діаграма $p-n$ переходу в нерівноважному стані. Рішення задач.
4	2	Параметри $p-n$ переходу для побудови ВАХ ідеалізованого $p-n$ переходу. Рішення задач.
5	3	ВАХ реального $p-n$ переходу з урахуванням напруги стабілізації стабілітронів. Рішення задач.
6	4	Практичні параметри біполярного транзистора ( $h$ -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 $p-n$ переході на його характеристики	10
	2. Плавний $p-n$ перехід та його особливості у порівняння зі східчастим	10
3	3. Стабістори	10
	4. Резонансно-тунельний діод	10
4	5. $h$ -параметри біполярного транзистора	10
	6. Пробій колекторного $p-n$ переходу біполярного транзистора	10
5	7. Високочастотні характеристики тиристорів	10
6	8. Бар'єр Шотткі. Зонна діаграма бар'єру Шотткі	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, а за кожне пропущене без поважної причини заняття віднімається 1 бал від семестрового рейтингу. Пропущені лабораторні заняття повинні бути відпрацьовані до початку екзаменаційної сесії. 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 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 міліметровці.

Для допуску до вимірювання *лабораторної роботи* необхідно попередньо ознайомитися з інструкціями та відповідати 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.

Перед першим та другим календарним контролем та на заліковому тижні проводитимуться *модульні контрольні роботи*, які пишуться письмово.

*Індивідуальне завдання (РГР)* – детальний опис характеристик та параметрів реальних приладів (приблизно трьох-чотирьох) для кожного типу напівпровідникових приладів, які були згадані під час лекцій. Звіт з РГР подається у вигляді власноруч заповненого зошиту. У разі виявлення ознак недоброчесності в практичній роботі або РГР – робота студента анулюється, а студенту видається нове індивідуальне завдання.

Для допуску до *іспиту та перескладань* необхідно здати всі лабораторні та практичні роботи та РГР, одночасно отримавши семестровий рейтинг не нижче 40 балів.

У разі набрання впродовж семестру не менше 60 балів студент має право отримати оцінку "автоматом", або відмовитися від такої можливості і піти на іспит. В останньому випадку семестровий

рейтинг анулюється і оцінка виставляється виключно по результатам іспиту. Іспит є письмовим, або усним за вибором студента. Усний білет на іспиті складається з 3-х питань, а письмовий – з 10-ти, по тематиці змістовних модулів, що виносяться на аудиторні заняття, та окремих питань, які виносяться на самостійне опрацювання.

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

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

**Календарний контроль:** модульні контрольні роботи.

**Семестровий контроль:** іспит.

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

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	20	60
2	РГР	1	10	10
3	Лабораторні роботи	5	3	15
4	Практичні роботи	5	3	15
<b>Усього за семестр</b>				<b>100</b>

2. Таблиця відповідності рейтингових балів оцінкам за університетською шкалою:

Кількість балів	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 занять змінюється, семестрові бали, наведені у п. 1, відповідним чином корегуються.

### Робочу програму навчальної дисципліни (силабус):

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

**Ухвалено** кафедрою мікроелектроніки (протокол № \_\_\_ від \_\_\_\_\_)

**Погоджено** Методичною комісією факультету (протокол № \_\_ від \_\_\_\_\_)