



## Силабус освітнього компонента

Програма навчальної дисципліни



# Напівпровідникові фотоелектричні перетворювачі

### Шифр та назва спеціальності

176 «Мікро- та наносистемна техніка»

### Інститут

ННІ Комп'ютерного моделювання, прикладної фізики та математики

### Освітня програма

Мікроелектроніка енергоефективності та електронний захист

### Кафедра

Мікро та наноелектроніки (167)

### Рівень освіти

Магістр

### Тип дисципліни

Спеціальна (фахова), Вибіркова

### Семестр

2

### Мова викладання

Українська

## Викладачі, розробники



### Кіріченко Михайло Валерійович

[Mykhailo.Kirichenko@khipi.edu.ua](mailto:Mykhailo.Kirichenko@khipi.edu.ua)

Кандидат технічних наук, старший дослідник, доцент кафедри мікро- та наноелектроніки НТУ «ХПІ».

Стаж роботи 16 років. Автор понад 200 наукових і навчально-методичних праць. Провідний викладач дисциплін: «Кристалічні сонячні елементи», «Комбіновані фотоенергетичні установки», «Вакуумна техніка», «Основи електронного захисту» та ін.

[Детальніше про викладача на сайті кафедри](#)

## Загальна інформація

### Анотація

При викладанні навчальної дисципліни «Напівпровідникові фотоелектричні перетворювачі» розглядаються основи фізики і техніки фотоелектричного перетворення сонячної енергії та напрямки і способи створення фотоелектричних перетворювачів з підвищеною ефективністю роботи.

### Мета та цілі дисципліни

Професійна підготовка в галузі фундаментальних засад розробки високоефективних напівпровідникових монокристалічних і плівкових фотоелектричних перетворювачів сонячної енергії для наземного та космічного застосування.

### Формат занять

Лекції, практичні заняття, лабораторні роботи, ІДЗ, реферат, консультації, залік.

### Компетентності

ЗК4. Здатність проводити досліджень на відповідному рівні.

ФК8. Здатність розробляти та застосовувати технологічні рішення виробництва приладів сонячної енергетики.

ФК9. Здатність досліджувати та експлуатувати прилади сонячної енергетики.

## Результати навчання

ПРН3. Оптимізувати конструкції систем, пристроїв та компонентів мікро- та наносистемної техніки, а також технології їх виготовлення.

ПРН4. Застосовувати спеціалізовані концептуальні знання, що включають сучасні наукові здобутки, а також критичне осмислення сучасних проблем у сфері мікро- та наноелектроніки, для розв'язування складних задач професійної діяльності.

ПРН11. Досліджувати процеси у мікро- та наноелектронних системах, приладах й компонентах з використанням сучасних експериментальних методів та обладнання, здійснювати статистичну обробку та аналіз результатів експериментів.

ПРН16. Проектувати, виготовляти, досліджувати параметри та експлуатувати пристрої сонячної енергетики у відповідності до вимог замовника.

## Обсяг дисципліни

Загальний обсяг дисципліни 180 год. (6 кредитів ECTS): лекції – 48 год., практичні заняття – 16 год., лабораторні роботи - 16 год., самостійна робота – 100 год.

## Передумови вивчення дисципліни (пререквізити)

Компетентності, якими має володіти студент (дисципліни): вища математика, загальна фізика, обчислювальна техніка, вступ до спеціальності, електроніка дефектів в напівпровідникових матеріалах; фізичні властивості та сучасні методи дослідження напівпровідникових приладових структур, українська мова, іноземна мова.

## Особливості дисципліни, методи та технології навчання

Теоретичний аналіз наукових джерел, створення власного технічного проекту, робота в малих групах, практичні вправи.

Дисципліна побудована на розгляді практичних рішень та проектів для промислових об'єктів України з урахуванням розгляду світових досягнень і рішень у сфері відновлюваної енергетики. В рамках самостійної роботи студентам пропонується розрахунково-графічна робота, яка дозволить сформулювати індивідуальні навички проектування завершених рішень для подальшої професійної діяльності.

## Програма навчальної дисципліни

### Теми лекційних занять

#### Тема 1. Вступ

Предмет, мета викладання і задачі дисципліни. Актуальність фотоелектричного перетворення енергії сонячного випромінювання. (2 год.)

#### Тема 2. Етапи розробки і застосування напівпровідникових фотоелектричних перетворювачів.

Головні історичні та технологічні віхи розробки напівпровідникових фотоелектричних перетворювачів. Сучасний стан розробок і використання напівпровідникових фотоелектричних перетворювачів в Україні і світі. Тенденції і обсяги ринку напівпровідникових фотоелектричних перетворювачів. (4 год.)

#### Тема 3. Характеристика сонячного випромінювання.

Заатмосферні спектральні розподіли потоків фотонів і енергії сонячного випромінювання. Сонячна стала. Вплив земної атмосфери на сонячне випромінювання. Залежність питомої потужності сонячного випромінювання від атмосферної маси на його шляху. (4 год.)

#### Тема 4. Загальне уявлення про явище фотоперетворення енергії сонячного випромінювання в електричну

Явище внутрішнього фотоелектричного ефекту. Генерація та рекомбінація носіїв заряду. Збирання фотогенерованих носіїв заряду. (2 год.)

#### Тема 5. Основні елементи конструкції монокристалічних кремнієвих фотоелектричних перетворювачів з горизонтальним анізотипним гомопереходом

Особливості базових кристалів і гомопереходів в залежності від призначення фотоперетворювачів. Контактна металізація їх фронтальної і тилової поверхонь. Просвітлення не затінених металізацією ділянок фронтальної поверхні. (4 год.)

**Тема 6. Фізичні механізми, що забезпечують роботу фотоелектричного перетворювача як генератора струму.**

Вихідні параметри та їх залежність від фотоструму і діодних параметрів фото-електричного перетворювача. Еквівалентна електрична схема. Світлова вольт-амперна характеристика та техніка її аналітичного опрацювання для визначення фотоструму, вихідних і діодних параметрів фотоелектричного перетворювача. (4 год.)

**Тема 7. Вплив оптичних параметрів базового кристалу на фотострум і діодні параметри фото-електричного перетворювача.**

Залежність густини фотоструму від коефіцієнту оптичного відбиття фото-приймальної поверхні базового кристалу фотоелектричного перетворювача. Залежність густини фотоструму від коефіцієнту і довжини поглинання світла у базовому кристалі фотоелектричного перетворювача (2 год.)

**Тема 8. Залежність густини діодного струму насичення від електронних параметрів базового кристалу фотоелектричного перетворювача.**

Вплив параметрів нерівноважних неосновних носіїв заряду на коефіцієнт їх збирання випрямляючим переходом і на густину фотоструму фотоелектричного перетворювача. Вплив параметрів нерівноважних неосновних носіїв заряду на коефіцієнт їх збирання випрямляючим переходом і на густину фотоструму фотоелектричного перетворювача. (4 год.)

**Тема 9. Вплив технологічних факторів на електронні параметри базового кристалу фотоелектричного перетворювача**

Приклади залежностей коефіцієнту збирання неосновних носіїв заряду, фотоструму, діодного струму насичення і вихідних параметрів серійних монокристалічних кремнієвих фотоелектричних перетворювачів від параметрів неосновних носіїв заряду в їх базових кристалах. (2 год.)

**Тема 10. Вплив параметрів нерівноважних неосновних носіїв заряду на коефіцієнт їх збирання випрямляючим переходом і на густину фотоструму фотоелектричного перетворювача.**

Основні матеріали, що використовуються при виробництві сучасних комбінованих систем. Технологічні основи створення. Принципи ефективного використання. Розрахунок ефективності комбінованої системи в залежності від конструкції та зовнішніх умов використання. (4 год.)

**Тема 11. Загальні уявлення щодо концепції ефективності фотоелектричних перетворювачів і напрямків її підвищення**

Втрати енергії сонячного випромінювання при його взаємодії з монокристалічним кремнієвим фотоелектричним перетворювачем, обумовлені природою базового кристалу і конструкцією фотоелектричного перетворювача. Втрати енергії сонячного випромінювання при його взаємодії з монокристалічним кремнієвим фотоелектричним перетворювачем, обумовлені деградацією приладу під впливом високоенергетичних часток і фотонів. (4 год.)

**Тема 12. Мінімізація втрат енергії сонячного випромінювання при його взаємодії з монокристалічним кремнієвим фотоелектричним перетворювачем.**

Оптимізація геометрії фронтального гребінчастого електроду та удосконалення просвітлюючого покриття фотоелектричного перетворювача. Текстурування і пасивація фотоприймальної поверхні базового кристалу. Способи підвищення структурної досконалості анізотипного гомопереходу. (4 год.)

**Тема 13. Підходи до оптимізації параметрів базового кристалу фотоелектричних перетворювачів.**

Оптимізація товщини і рівня легування n+-шару для підвищення ККД фотоелектричного перетворювача з n+-р гомопереходом. (2 год.)

**Тема 14. Удосконалення об'єму кремнієвого базового кристалу.**

Використання потоншених кристалів з планарними поверхнями типу (100). Перехід від кристалів р-типу провідності до кристалів n-типу провідності для фотоелектричних перетворювачів наземного застосування. Заміна бора на галій при легуванні базових кристалів для фотоелектричних перетворювачів космічного застосування. Реалізація ефекту тилового поля та зниження густини поверхневих рекомбінаційних станів. Створення оптимізованих оптичних двошарових тильноповерхневих рефлекторів (2 год.)

**Тема 15. Загальні уявлення про роботу фотоелектричних перетворювачів в умовах концентрованого сонячного випромінювання.**

Залежність вихідних параметрів і коефіцієнта корисної дії фотоелектричного перетворювача від коефіцієнта концентрації сонячного випромінювання на його фотоприймальній поверхні. Особливості конструкцій з горизонтальними та вертикальними діодними комітками і базових напівпровідникових матеріалів фотоелектричних перетворювачів концентрованого сонячного випромінювання. Сучасні системи концентрації сонячного випромінювання. (2 год.)

**Тема 16. Загальні уявлення про фізико-технологічні особливості розробки плівкових фотоелектричних перетворювачів.**

Конструкції і параметри сучасних плівкових високоефективних фотоелектричних перетворювачів на основі полікристалічних гетероструктур CdS/CdTe та CdS/CuIn(Ga)Se<sub>2</sub> і аморфного кремнію. (2 год.)

### **Теми практичних занять**

**Тема 1. Розрахунок товщини шару, у якому при заданій довжині хвилі випромінювання поглинається певний відсоток фотонів, що надходять через фотоприймальну поверхню кремнієвого кристалу.**

**Тема 2. Розрахунок ККД монокристалічного кремнієвого фотоелектричного перетворювача в залежності від його фотоструму і діодних параметрів при заатмосферному сонячному опромінюванні**

**Тема 3. Розрахунок оптимальних геометричних розмірів гребінчастого електроду монокристалічного кремнієвого фотоелектричного перетворювача з відомими параметрами його діодної структури та при заданому ступеню її затінення електродом**

**Тема 4. Розрахунок максимально доцільного ступеня концентрації сонячного випромінювання на фотоприймальній поверхні монокристалічного кремнієвого фотоелектричного перетворювача в залежності від контактної різниці потенціалів його діодної структури, послідовного опору, фотоструму і діодного струму насичення**

### **Теми лабораторних робіт**

**ЛР 1. Визначення фотоструму, вихідних і діодних параметрів монокристалічних кремнієвих фотоелектричних перетворювачів за їх світловими вольт-амперними характеристиками.**

**ЛР 2. Визначення часу життя і дифузійної довжини неосновних носіїв заряду в опромінюваних кремнієвих фотоелектричних перетворювачах.**

**ЛР 3. Визначення фотоструму, вихідних і діодних параметрів монокристалічних кремнієвих фотоелектричних перетворювачів при їх роботі в умовах концентрованого сонячного випромінювання.**

**ЛР 4. Дослідження впливу геометричних параметрів гребінчастого електроду монокристалічного кремнієвого фотоелектричного перетворювача на величину фотоструму, вихідних і діодних параметрів.**

### **Самостійна робота**

Самостійна робота студента виконується у вигляді реферата (на вибір):

1. Конструкція, принцип роботи і параметри монокристалічних кремнієвих фотоелектричних перетворювачів з горизонтальним гомопереходом.
2. Вихідні параметри та їх залежність від фотоструму і діодних параметрів фотоелектричного перетворювача.
3. Методи визначення фотоструму, вихідних і діодних параметрів монокристалічних кремнієвих фотоелектричних перетворювачів за їх світловими вольт-амперними характеристиками.
4. Способи визначення часу життя і дифузійної довжини неосновних носіїв заряду в опромінюваних кремнієвих фотоелектричних перетворювачах.
5. Вплив оптичних властивостей і електронних параметрів базових кристалів на ефективність роботи кремнієвих фотоелектричних перетворювачів.
6. Залежності коефіцієнта збирання неосновних носіїв заряду, фотоструму, діодного струму насичення і вихідних параметрів монокристалічних кремнієвих фотоелектричних перетворювачів від параметрів неосновних носіїв заряду в їх базових кристалах..
7. Сучасні розробки високоефективних напівпровідникових фотоелектричних перетворювачів.

8. Способи підвищення коефіцієнта корисної дії монокристалічних кремнієвих фотоелектричних перетворювачів з горизонтальною діодною структурою, які призначені для роботи в умовах природного сонячного випромінювання.
9. Особливості конструкцій і базових напівпровідникових матеріалів фотоелектричних перетворювачів концентрованого сонячного випромінювання.
10. Сучасні системи концентрації сонячного випромінювання та залежність коефіцієнта корисної дії фотоелектричного перетворювача від коефіцієнта концентрації сонячного випромінювання на його фотоприймальній поверхні.
11. Фізико-технологічні особливості розробки плівкових фотоелектричних перетворювачів.
12. Конструкції і параметри сучасних плівкових фотоелектричних перетворювачів на основі полікристалічної гетероструктури CdS/CdTe.
13. Конструкції і параметри сучасних плівкових фотоелектричних перетворювачів на основі полікристалічної гетероструктури CdS/Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub>.

## Література та навчальні матеріали

### Основна література:

1. Проблеми енергетики на межі XXI століття: Навч. посібник. / ТОВАЖНЯНСЬКИЙ Л.Л., ЛЕВЧЕНКО Б.О. – Харків: НТУ «ХПІ», 2006. – 200 с.
2. Semiconductor Device Physics: Basic Principles, 4th ed. / D. Neamen. - McGraw- Hill, New York, NY, USA, 2012.
3. Physics of Solar Cells. / P. Würfel. - WILEY-VCH Verlag, Weinheim, Germany, 2005.
4. Solar energy. The physics and engineering of photovoltaic conversion, technologies and systems. / A. Smets, K. Jäger, O. Isabella, R. van Swaaij, M. Zeman. - UIT Cambridge Ltd, England, 2016.
5. Методичні вказівки до лабораторних робіт «Дослідження електронних параметрів і рекомбінаційних процесів в діодних напівпровідникових структурах за їх вольт-амперними, вольт-фарадними і амплітудно-часовими характеристиками» / Уклад.: В.Р. Копач, Г.С. Хрипунов, Р.В. Зайцев, М.В. Кіріченко. – Харків: НТУ «ХПІ», 2013. – 59 с.
6. Technology Bases of Combined Photovoltaic Systems / R. Zaitsev, M. Kirichenko, K. Minakova, G. Khrypunov, V. Nikitin - Transactions on Physics & Math in Engineering Science, Ser.A, Vol. 1, Kharkiv: NTU "KhPI", 2023. - 240 p.
7. Комбіновані фотоенергетичні системи / Р.В. Зайцев, Г.С. Хрипунов, М.В. Кіріченко, А.В. Меріуц - Харків: Стильздат, 2020. – 324 с.
8. High Concentrator Photovoltaics / ed. by Pedro Pérez-Higueras, Eduardo F. Fernández - Springer, 2015. - 477 p.
9. Handbook of Photovoltaic Science and Engineering / ed. by Antonio Luque, Steven Hegedus - John Wiley & Sons, 2010. - 1132 p.

### Додаткова література:

1. Забарний Г. М. Енергетичний потенціал нетрадиційних джерел енергії України. НАН України. Ін-т техн. теплофізики. - К., 2002. - 210 с.
2. Атлас енергетичного потенціалу відновлюваних та нетрадиційних джерел енергії України. Під редакцією Кудрі. С.О. – Київ: Інститут відновлюваної енергетики НАН України, 2020. – 82 с.
3. Адаменко О.М. Альтернативні палива та інші нетрадиційні джерела енергії: [монографія] / О.М. Адаменко. - Івано-Франківськ: ІМЕ, 2010. - 432 с.
4. Альтернативна енергетика / М. Д. Мельничук, В. О., Дубровін, В. Г. Мироненко та ін. - Київ: Аграр Медіа Груп, 2012. -244 с.



## Система оцінювання

### Критерії оцінювання успішності студента та розподіл балів

Підсумкова оцінка складається із наступних обов'язкових частин:

1. Звіти за результатами розрахунків практичних занять 1-4 - 10 балів кожний (40%).
2. Звіти за результатами лабораторних робіт 1-4 - 10 балів кожний (40%).
2. Звіт за результатами реферату - 20 балів (20%).

### Шкала оцінювання

Сума балів	Національна оцінка	ECTS
90-100	Відмінно	A
82-89	Добре	B
75-81	Добре	C
64-74	Задовільно	D
60-63	Задовільно	E
35-59	Незадовільно (потрібне додаткове вивчення)	FX
1-34	Незадовільно (потрібне повторне вивчення)	F

## Норми академічної етики і політика курсу

Студент повинен дотримуватися «Кодексу етики академічних взаємовідносин та доброчесності НТУ «ХПІ»: виявляти дисциплінованість, вихованість, доброзичливість, чесність, відповідальність. Конфліктні ситуації повинні відкрито обговорюватися в навчальних групах з викладачем, а при неможливості вирішення конфлікту – доводитися до відома співробітників дирекції інституту. Нормативно-правове забезпечення впровадження принципів академічної доброчесності НТУ «ХПІ» розміщено на сайті: <http://blogs.kpi.kharkov.ua/v2/nv/akademichna-dobrochesnist/>

## Погодження

Силабус погоджено

24.06.2024

Завідувач кафедри  
Роман ЗАЙЦЕВ

24.06.2024

Гарант ОП  
Роман ЗАЙЦЕВ