



Моделювання технологій напівпровідникових матеріалів

Робоча програма навчальної дисципліни (Силабус)

Реквізити навчальної дисципліни

Рівень вищої освіти	<i>Другий (магістерський)</i>
Галузь знань	<i>15 Автоматизація та приладобудування</i>
Спеціальність	<i>153 Мікро- та наносистемна техніка</i>
Освітня програма	<i>Мікро- та наноелектроніка</i>
Статус дисципліни	<i>Вибіркова</i>
Форма навчання	<i>очна(денна)</i>
Рік підготовки, семестр	<i>1 курс, весняний семестр</i>
Обсяг дисципліни	<i>5 кредитів ЕКТС (150 годин)</i>
Семестровий контроль/ контрольні заходи	<i>Екзамен, РГР, МКР</i>
Розклад занять	<i>https://roz.kpi.ua</i>
Мова викладання	<i>Українська</i>
Інформація про керівника курсу / викладачів	<i>Лектор, Практичні: доктор філософії, Шевлякова Ганна Вікторівна, g.shevliakova-me@i11.kpi.ua, +38(095)856-39-96</i>
Розміщення курсу	<i>Код Google classroom: zej7q6p</i>

Програма навчальної дисципліни

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

Основною **метою** дисципліни «Моделювання технологій напівпровідникових матеріалів» є навчити студентів основам моделювання технологічних процесів, розвинути навички використання моделей для розв'язку прикладних задач.

Згідно з вимогами програми навчальної дисципліни студенти після засвоєння дисципліни мають продемонструвати такі результати навчання:

Знання: сучасних моделей компонентів інтегральних мікросхем, сучасних моделей технологічних процесів електроніки, а також засобів та методів моделювання в електроніці та мікроелектроніці.

Уміння: використовувати сучасні моделі електроніки та мікроелектроніки, використовувати засоби моделювання, використовувати спеціалізоване програмне забезпечення для моделювання в електроніці, використовувати засоби та методи моделювання з метою розробки нових моделей.

Досвід: практичного використання сучасних моделей електроніки та засобів моделювання в професійній діяльності, самостійної розробки моделей електронних матеріалів, компонентів та технологічних процесів електроніки.

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

Дисципліна «Моделювання технологій напівпровідникових матеріалів» спирається на наступні дисципліни (пререквізити дисципліни):

- Математичний аналіз;
- Фізика (розділи термодинаміки і молекулярної фізики);
- Технологічні основи електроніки;
- Моделювання в електроніці;
- Проектування мікро- та наноелектронних пристроїв;
- Обчислювальна математика;
- Хімія матеріалів електроніки;
- Фізика конденсованого стану.

Результати навчання даної дисципліни використовуються для опанування освітніми компонентами (постреквізити дисципліни):

- Практика;
- Виконання магістерської дисертації.

3. Зміст навчальної дисципліни

Розділ 1. Термодинамічні потенціали.

Розділ 2. Фазові перетворення 1-го роду в однокомпонентних системах

Розділ 3. Елементи термодинаміки багатоконпонентних систем. Розчини.

Розділ 4. Фазові рівноваги в бінарних системах, компоненти якої не утворюють хімічної сполуки

Розділ 5. Зонна плавка

Розділ 6. Фазові рівноваги в бінарних системах та багатоконпонентних твердих розчинах з ізовалентним катіонно-аніонним співвідношенням

Розділ 7. Моделювання процесів рідкофазної епітаксії (РФЕ) твердих розчинів з ізовалентним катіонно-аніонним співвідношенням методом примусового охолодження в квазірівноваговому наближенні

Розділ 8. Умови отримання епітаксціальних варізонних структур з планарною гетеромежею

4. Навчальні матеріали та ресурси

Базова література:

1. Домбругов М.Р. Моделювання технології напівпровідникових матеріалів: конспект. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. – 136 с. URL: <https://me.kpi.ua/downloads/mod-tpm.pdf>.
2. Моделювання технології напівпровідникових матеріалів. Лабораторний практикум. Електронний ресурс: навчальний посібник для студентів, які навчаються за спеціальністю 153 – «Мікро- та наносистемна техніка», спеціалізацією «Мікро- та наноелектронні прилади і пристрої» / М.Р.Домбругов. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. – 43 с. <https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/24860/3/lab-mod-tpm.pdf>

Додаткова література:

1. S. Davidson, "Electronic Design Automation for IC Implementation, Circuit Design, and Process Technology and Electronic Design Automation for IC System Design, Verification, and Testing," IEEE Des. Test, vol. 35, no. 3, pp. 98–99, Jun. 2018, doi: 10.1109/MDAT.2018.2814988.

5. Методика опанування навчальної дисципліни (освітнього компонента)

Лекційні заняття:

- Лекція 1. **Розділ 1.** Температура та ентропія. Ізотермічні та адиабатичні процеси. Збереження енергії в теплових процесах. Перше начало термодинаміки. PV- та TS-діаграми. Принцип Больцмана.
- Лекція 2. **Розділ 1.** Друге начало термодинаміки. Незворотні процеси. Ентальпія. Теплоємність. Розрахунок зміни ентропії при нагріві або охолодженні системи. Вільна енергія. Екстремальні властивості термодинамічних потенціалів. Зауваження з приводу позначень.
- Лекція 3. **Розділ 1.** Зміна вільної енергії при нагріві або охолодженні системи. Екстенсивні та інтенсивні величини. Компоненти системи. Поняття хімічного потенціалу. Хімпотенціал в однокомпонентній системі.
- Лекція 4. **Розділ 3.** Фази і фазові переходи 1-го роду. Теплота фазового перетворення. Зміна ентропії при фазовому переході 1-го роду. Умова рівноваги фаз в однокомпонентній системі. Рівняння Клапейрона-Клаузіуса. Залежність температури плавлення від тиску. Перетворення конденсованої фази в парову.
- Лекція 5. **Розділ 3.** Мольні долі компонентів розчину. Парціальні мольні величини. Парціальні мольні величини в бінарному розчині. Ідеальні розчини. Ентропія змішування і хімічні потенціали в ідеальному розчині.
- Лекція 6. **Розділ 3.** Неідеальні розчини. Коефіцієнти активності. Модельні представлення неідеальних розчинів на прикладі бінарних систем. Параметр взаємодії. Моделі простих розчинів, Гуггенгейма, Маргулеса, Ван-Лаара. Розслоювання розчинів.
- Лекція 7. **Розділ 3.** Умови рівноваги багатокомпонентних фаз. Правило фаз Гіббса. Приклади застосування правила фаз Гіббса. Потрійна точка.
- Лекція 8. **Розділ 4.** Фазові рівноваги в ідеальних розчинах з необмеженою розчинністю компонентів в рідкій і твердій фазах. Рівняння Ван-Лаара.. Розв'язання рівнянь Ван-Лаара. Діаграма стану сигароподібного типу. Приклад: розрахунок ліквідуса і солідуса в системі Ge-Si. Фазові рівноваги в системі, що не утворює розчинів в твердій фазі. Застосування моделі ідеальних розчинів. Логарифміка Шредера. Другий закон Рауля щодо зниження температури кристалізації розчинів. Евтектика. Приклад: розрахунок ліквідуса в системі Cd-Bi.
- Лекція 9. **Розділ 4.** Вигляд діаграми стану при необмеженій розчинності компонентів в рідкій фазі і обмеженій – в твердій. Застосування моделей неідеальних розчинів для розрахунку фазових рівноваг в бінарних системах. Коефіцієнт розподілу. Рівновага G-L (gaz-liquid, газ-рідина). Тиск насичених парів над розчином. P-T-X діаграма. Закони Рауля. Діаграма кипіння бінарного розчину.
- Лекція 10. **Розділ 5.** Нормальна кристалізація: основні модельні припущення. Нормальна кристалізація: рівняння та розрахунок профіля домішки після перекристалізації. Експериментальне визначення коефіцієнта розподілу.
- Лекція 11. **Розділ 5.** Зонна плавка: основні рівняння. Зонна очистка: перший прохід зони. Подальші проходи зони. Кінцевий розподіл домішки.
- Лекція 12. **Розділ 6.** Умови хімічної рівноваги при хімічній реакції. Фазові рівноваги в бінарній системі з проміжною сполукою в твердій фазі. Застосування моделі ідеальних розчинів. Рівняння Віланда. Особливості розв'язку рівнянь Віланда. Приклад: розрахунок ліквідуса в системі In-P.
- Лекція 13. **Розділ 6.** Застосування моделей неідеальних розчинів. Особливості рівноваги L-S в системах $A^{III}B^V$ ($A=Al, Ga, In; B=P, As, Sb$), $AIBVI$ ($A=Zn, Cd, Hg; B=S, Se, Te$), $AVIBVI$ ($A=Pb, Sn$);

- $B=S, Se, Te$). Область гомогенності. Рівновага G-L. Тиск насичених парів над розчином. РФЕ з підживленням з газової фази. Потрійна рівновага G-L-S в системі з проміжною сполукою.
- Лекція 14. **Розділ 6.** Загальна характеристика напівпровідникових трикомпонентних твердих розчинів $A_{1-x}B_xC$. Залежність електрофізичних властивостей від складу твердого розчину. Концентраційний трикутник. Квазібінарний розріз. Поверхня ліквідуса. Ізотерми. Коноди. Ізоконцентрати солідуса. Поверхня солідуса (область чи «трубка» гомогенності). Рівняння діаграми стану в моделі ідеальних розчинів. Застосування моделей неідеальних розчинів. Рівняння квазібінарного розрізу AC-BC.
- Лекція 15. **Розділ 6.** Проблеми епітаксіального росту трикомпонентних твердих розчинів на підкладках з неузгодженим параметром кристалічної решітки. Поняття когерентної діаграми стану. Ефект стабілізації складу твердої фази і пониження температури ліквідусу.
- Лекція 16. **Розділ 7.** Рушійна сила процесу росту. Модельні припущення. Рівняння росту для бінарної системи. Рівняння росту в системах з довільним числом компонентів.
- Лекція 17. **Розділ 7.** Рівняння росту для потрійних систем типу $A_{1-x}B_xC$. Особливості рівновагової кристалізації в системах типу $A_{1-x}B_xC$ елементів III-V, II-VI, IV-VI груп. Інверсна крива..
- Лекція 18. **Розділ 8.** Проблема отримання планарних гетеромеж. Модель Смолла-Геза. Загальний термодинамічний критерій сталості твердої фази, що контактує з багатокомпонентним рідким розчином в стані, відмінному від рівноваги. Особливості взаємодії насиченого розчину з підкладкою в системах $A^{III}B^V$ та $A^{VI}B^{VI}$.

Практичні заняття:

1. Вступний контроль.
2. Моделювання фазової рівноваги конденсований стан – пара для простих речовин.
3. Моделювання фазових діаграм бінарних систем з евтектикою в моделі регулярних розчинів.
4. Моделювання фазових діаграм бінарних систем з евтектикою в моделі регулярних розчинів.
5. Моделювання зонної очистки.
6. Моделювання фазових діаграм бінарних систем з проміжною сполукою типу AC.
7. Моделювання фазових діаграм твердих розчинів типу $A_{1-x}B_xC$.
8. Моделювання рідкофазної епітаксії твердих розчинів типу $A_{1-x}B_xC$.
9. Захист практичних робіт

6. Самостійна робота здобувача вищої освіти

Самостійна робота студента полягає у виконанні розрахункової роботи, підготовці до модульних контрольних робіт, виконанні та захисті практичних робіт а також на самостійне опрацювання винесені такі теми: Моделювання методом найменших квадратів; Умови хімічної рівноваги при хімічній реакції; Застосування моделей неідеальних розчинів; Трьохкомпонентні тверді розчини; Чотирьохкомпонентні тверді розчини; Концентраційний тетраедр; Трикутник або квадрат твердої фази; Когерентні діаграми стану в четверних системах; Рідиннофазна епітаксія тевердих розчинів; Проблема отримання планарних гетеромеж.

Політика та контроль

7. Політика навчальної дисципліни (освітнього компонента)

- Відвідування занять є обов'язковим.
- Виконання практичних робіт та розрахункової роботи є обов'язковою умовою для допуску для захисту і до екзамену.
- Виконання практичного завдання полягає у тому, що студент практично реалізує алгоритм поставленої викладачем задачі, складає документ, креслення, презентацію,

програму тощо. захист роботи передбачає відповідь студента на 4-5 контрольних запитань по темі роботи.

- В умовах дистанційного режиму заняття проходять у Google Classroom.
- Звіти про виконання практичних робіт та пояснювальна записка до розрахункової роботи оформлюються згідно з ДСТУ 3008-2015.
- Всі види робіт здаються до системи Google Classroom у PDF форматі.
- Обов'язковим є дотримання норм академічної доброчесності.
-

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

Поточний контроль: МКР, практичні роботи, розрахункова робота.

Календарний контроль: провадиться двічі на семестр як моніторинг поточного стану виконання вимог силабусу. Для успішного проходження календарного контролю студент повинен набрати не менше 40% від максимального рейтингу, який студенти могли заробити на поточний момент.

Семестровий контроль: екзамен.

Умови допуску до семестрового контролю: семестровий рейтинг не менше 40 балів, виконання всіх практичних робіт та розрахункової роботи.

У разі отримання в продовж семестру рейтингу більше 60 балів, студент має можливість отримати оцінку «автоматом» згідно до таблиці 8.2, за умови, що це не суперечитиме діючому положенню про PCO в КПІ ім. Ігоря Сікорського.

1. Система отримання рейтингової оцінки за видами занять за кожний модуль:

№ п/п	Заняття, що підлягають рейтинговій оцінці	Загальна кількість завдань	Максимальний бал за 1 завдання	Кількість балів на "відмінно"
1.	Лекції: експрес-опитування	7	2	14
2.	Модульна контрольна робота	2	15	30
3.	Розрахункова робота	1	20	21
4.	Практичні роботи: Звіт Захист	7	2 3	35
Семестрові рейтингові бали:				100

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

Робочу програму навчальної дисципліни (силабус):

Складено асистент, доктор філософії Шевлякова Ганна Вікторівна.

Ухвалено кафедрою мікроелектроніки (протокол № 19 від 15.06.2022 р.)

Погоджено Методичною комісією факультету електроніки (протокол № 06/22-1 від 28.06.2022 р.)