



Функціональні діелектрики в електроніці

Робоча програма навчальної дисципліни (Силабус)

Реквізити навчальної дисципліни

Рівень вищої освіти	Перший (бакалаврський)
Галузь знань	15 Автоматизація та приладобудування ¹
Спеціальність	153 Мікро- та наносистемна техніка
Освітня програма	Мікро- та наноелектроніка
Статус дисципліни	Нормативна
Форма навчання	очна /дистанційна
Рік підготовки, семестр	III курс, весняний семестр
Обсяг дисципліни	90
Семестровий контроль/ контрольні заходи	Контрольні роботи
Розклад занять	
Мова викладання	Українська/англійська
Інформація про керівника курсу / викладачів	Лектор: професор, доктор фіз.-мат. наук Поплавко Юрій Михайлович Практичні / Семінарські: Поплавко Юрій Михайлович yu.poplavko@kpi.ua
Розміщення курсу	Googleclassroom

Програма навчальної дисципліни

Опис навчальної дисципліни "Функціональні діелектрики в електроніці", її мета, предмет вивчення та результати навчання

- Функціональні діелектрики здатні перетворювати енергію та інформацію і займають важливе місце в радіоелектроніці і інформаційних технологіях. Використання електронної і електротехнічної апаратури в різних умовах, розвиток обчислювальної техніки та мініатюризація апаратури висувають нові вимоги до діелектричних матеріалів. При цьому діелектрики слугують не тільки електроізолюючою частиною різних елементів, конструкцій або апаратів, але й використовуються також як активні елементи електронних і електричних схем.
- У курсі *вивчаються* особливості структури та симетрії діелектриків; розглядаються основні механізми електричних механічних та теплових процесів у діелектриках. Пояснюється зв'язок структури з електричними властивостями активних діелектриків (піро- та п'єзоелектриків, сегнетоелектриків, електретів тощо).
- Студенти *навчаються*: Визначати основні механізми діелектричної поляризації та діелектричних втрат; встановлювати зв'язок атомних параметрів із характеристиками матеріалу. Визначати основні фізичні причини діелектричної нелінійності, п'єзо- та піроефектів, оптичних ефектів тощо, що застосовуються мікроелектронікою; визначати домінуючі механізми електричної поляризації та втрат у кристалах та полікристалах. Розраховувати параметри анізотропних активних матеріалів.

¹В полях Галузь знань/Спеціальність/Освітня програма:

Для дисциплін професійно-практичної підготовки зазначається інформація відповідно до навчального плану.

Для соціально-гуманітарних дисциплін вказується перелік галузей, спеціальностей, або «для всіх».

Оцінювати та розраховувати електричні параметри активних діелектриків; визначати основні механізми діелектричної поляризації та діелектричних втрат. Розраховувати параметри анізотропних активних матеріалів.

Метою навчальної дисципліни "Функціональні діелектрики в електроніці" є формування у студентів компетентностей:

Загальні компетентності СВО:

ЗК 1. Здатність застосовувати знання у практичних ситуаціях.

ФК 2. Здатність брати участь у плануванні і виконанні експериментів та лабораторних досліджень властивостей фізичних систем, фізичних явищ і процесів, обробленні й презентації їхніх результатів.

ФК 3. Здатність брати участь у виготовленні експериментальних зразків, інших об'єктів дослідження.

ФК 4. Здатність брати участь у впровадженні результатів досліджень та розробок.

ФК 5. Здатність до постійного розвитку компетентностей у сфері матеріалів електроніки, інженерії та комп'ютерних технологій.

ФК 6. Здатність використовувати сучасні теоретичні уявлення в галузі фізики діелектриків для аналізу фізичних систем.

ФК 7. Здатність використовувати методи і засоби теоретичного дослідження та математичного моделювання в професійній діяльності.

Після засвоєння навчальної дисципліни студенти мають продемонструвати такі результати навчання:

- *знання* про особливості структури та симетрії твердих тіл, про можливі дефекти кристалічної структури та механізми електричних і магнітних процесів у діелектриках тілах, про зв'язок структури з електричними властивостями діелектриків, про нанофізику і нанотехнологію;

- *уміння* щодовизначити основні механізми електропровідності, поляризації, намагнічування, фазових перетворень в діелектриках, тощо;

- *досвід* з встановлення зв'язку між технологічними процесами отримання та обробки матеріалів та їх електрофізичними параметрами; практичного визначення основних електрофізичних параметрів електропереносу заряду, діелектричної поляризації, намагнічування, п'єзо- та піроелектричних ефектів та ін., що застосовуються в мікро- та нанoeлектроніці; розрахунків основних електрофізичних параметрів діелектриків.

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

Перереквізити: Фізика (ЗО9), фізика твердого тіла (ЗО18), матеріали і компоненти мікро- та наносистемної техніки (ПО8)

Постреквізити: Функціональна електроніка (ПО2), переддипломна практика (ПО11), дипломне проектування (ПО12), мікрохвильова електроніка (ПВ5), Зміст навчальної дисципліни

Перелік розділів і тем

Розділ 1. Базові поняття. Поляризація і електропровідність діелектриків. *Тема 1. Симетрія кристалів, Тема 2. Атомні зв'язки в активних діелектриках. Тема 3. Механізми електропереносу*

Розділ 2. Фізичні механізми поляризації схем. *Тема 1. Макроскопічна теорія. Тема 2. Мікроскопічна теорія. Тема 3. Механізми піроелектрики. Тема 4. Механізми п'єзоелектрики.*

Розділ 3. Динамічні моделі поляризації та втрат. *Тема 1. Електронна поляризація. Тема 2. Іонна поляризація. Тема 3. Дипольна поляризація. Тема 4. Діелектрична спектроскопія.*

Тема 5. Електромеханічні ефекти. Тема 6. Електротеплові ефекти. Тема 7. Природа спонтанної поларизації. Тема 8. Фазові переходи.

Розділ 4. Електрична міцність діелектриків. Тема 1. Електронний пробій. Тема 2. Електротепловий пробій. Тема 3. Електрохімічний пробій.

2. Навчальні матеріали та ресурси дисципліни

Основна література:

1. Ю.М. Поплавко. Фізика діелектриків. Київ, НТУУ "КПІ" Політехніка, 2015, 568 стор. **Підручник**. Затверджено МОН (Лист №1/11-16679 від 04.11.2013 р.)
2. Ю.М. Поплавко, Л.П. Переверзева, О.С. Воронов, Ю.І. Якименко. «ФІЗИЧНЕ МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО. Частина 2. ДІЕЛЕКТРИКИ.

Додаткова література:

1. Ю.М. Поплавко, Фізика твердого тіла. Том 1 Структура, квазічастинки, метали, магнетики, Київ, вид. «Інженірінг». **Підручник**, 2017, 415 стор. Затверджено Вченою Радою НТУУ КПІ (протокол №5 15.05 2017 р.) (Електронна бібліотека каф. Мікроелектроніки)
3. Ю.М. Поплавко, Фізика твердого тіла. Том 2 Діелектрики, напівпровідники, фазові переходи, Київ, вид. «Інженірінг». **Підручник**, 2017, 379 стор. Затверджено Вченою Радою НТУУ КПІ (протокол №5 15.05 2017 р.) (Електронна бібліотека каф. Мікроелектроніки)
4. Yu.M. Poplavko. Solid state elementary electrophysics, Vol. 1 Symmetry, quasi-particles, metals, magnetism. Kyiv, Edited by Igor Sicorsky Polytechnic Institute, 2016, 364 pages. Tutorial approved by Academic Council of Igor Sicorsky Polytechnic Institute (protocol №11 of November 7, 2016).
5. Yu.M. Poplavko. Solid state elementary electrophysics, Vol. 2 Semiconductors, dielectrics, phase transitions. Kyiv, Edited by Igor Sicorsky Polytechnic Institute, 2016, 364 pages. Tutorial approved by Academic Council of Igor Sicorsky Polytechnic Institute (protocol №11 of November 7, 2016).
5. Yuriy Poplavko. Polar crystals. Physical nature and new effects. LAMBERT, Saarbrücken, Academic Publishing, 2014. 84 pages.
6. Yuriy M. Poplavko. **Physics of active dielectrics**. Volume 1. Polarization, conduction, losses, breakdown. 349 pages. LAMBERT Academic Publishing. 2015. Навчальний посібник: Гриф «КПІ» - рішення Наукової Ради НТУУ Протокол №6 від 30 червня 2015 р.
7. Yuriy M. Poplavko. **Physics of active dielectrics**. Volume 2. Piezoelectrics, pyroelectrics, ferroelectrics, phase transitions. 251 pages. LAMBERT Academic Publishing. 2015. Навчальний посібник: Гриф «КПІ» - рішення Наукової Ради НТУУ Протокол №6 від 30 червня 2015 р.
8. Yuriy M. Poplavko. Electronic materials. Principles and applied science. 2019, 683 pages. Edited by ELSEVIER, USA.
9. Yu.M. Poplavko, Yu.I. Yakymenko. Functional dielectrics for electronics. Fundamentals of conversion properties. 2020, 294 pages. Edited by ELSEVIER, USA.
10. Yuriy M. Poplavko. Dielectric spectroscopy of electronic materials. Applied physics of dielectrics. 2021, 400 pages. Edited by ELSEVIER, USA.

Навчальний контент

3. Методика опанування навчальної дисципліни(освітнього компонента)

Надається інформація (за розділами, темами) про всі навчальні заняття (лекції, практичні, семінарські, лабораторні) та надаються рекомендації щодо їх засвоєння Самостійна робота студента/аспіранта.

Підготовка до аудиторних занять, проведення розрахунків за первинними даними, розв'язок задач, написання реферату, виконання розрахункової роботи, виконання домашньої контрольної роботи тощо)

Політика та контроль

4. Політика навчальної дисципліни (освітнього компонента)

Заохочується надання відповідей на завдання з використанням англійської мови. В рамках дисципліни заплановано наступні види навчальних занять:

- лекції;
- практичні заняття;
- самостійна робота.

Теми дисципліни взаємозв'язані, матеріал вивчається в логічній послідовності. На заняттях розкриваються найбільш суттєві теоретичні питання, які дозволяють забезпечити студентам можливість глибокого самостійного вивчення всього програмного матеріалу. Теми та порядок виконання практичних занять сформовано в логічній послідовності і повністю узгоджуються з лекційним матеріалом. Теоретичні та практичні знання поглиблюються шляхом самостійної роботи з використанням рекомендованої літератури та інформаційних ресурсів мережі Internet.

На заняттях використовуються персональний комп'ютер, загальнонавчальні комп'ютерні програми і операційні системи, проектор, інтерактивна дошка, інтернет-ресурси.

Контроль засвоєння навчального матеріалу здійснюється індивідуальним опитуванням (тестуванням), домашньою контрольною роботою та заліком.

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

Відвідування занять

Студентам рекомендується відвідувати заняття. Система оцінювання орієнтована на отримання балів за активність студента, а також виконання завдань, які здатні розвинути практичні уміння та навички. Відсутність на практичних заняттях, без поважних причин штрафується від'ємними балами.

Порушення термінів виконання завдань та заохочувальні бали

Заохочувальні бали		Штрафні бали	
Критерій	Ваговий бал	Критерій	Ваговий бал
Участь у міжнародних, всеукраїнських та/або інших заходах та/або конкурсах (за тематикою навчальної дисципліни)	5-10 балів в залежності від місця, яке зайняв	Порушення термінів експрес-опитування	- 2 бали
Виступ на занятті з ініціативною доповіддю на обрану творчу тему за програмою дисципліни	5 балів	Порушення термінів виконання тестування	-5 балів
Відповіді на завдання з використанням англійської мови	5 балів	Порушення термінів виконання домашньої контрольної роботи та її захисту (за кожен таку роботу)	-2 бали

Пропущені контрольні заходи

Результат залікової контрольної роботи для студента, який не з'явився на контрольний захід, є нульовим. У такому разі, студент має можливість написати залікову контрольну роботу, але максимальний бал за неї буде дорівнювати 50% від загальної кількості балів. Повторне написання залікової контрольної роботи не допускається.

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 працівників визначені у розділі 2 Кодексу честі Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». Детальніше: <https://kpi.ua/code>.

Процедура оскарження результатів контрольних заходів

Студенти мають можливість підняти будь-яке питання, яке стосується процедури контрольних заходів та очікувати, що воно буде розглянуто згідно із наперед визначеними процедурами.

Студенти мають право оскаржити результати контрольних заходів, але обов'язково аргументовано, пояснивши з яким критерієм не погоджуються відповідно до оціночного листа та/або зауважень.

Поточний контроль: тестування (експрес-опитування), домашня контрольна робота.

Календарний контроль: атестація проводиться двічі на семестр як моніторинг поточного стану виконання вимог програми.

Критерій		Перша атестація	Друга атестація	
Термін атестації 2		8-ий тиждень	14-ий тиждень	
Умови отримання атестації	Поточний рейтинг 3		≥ 10 балів	≥ 30 балів
	Поточний контрольний захід	Тестування 1-2	+	–
	Поточний контрольний захід	Домашня контрольна робота 1	+	–
	Поточний контрольний захід	Тестування 3-8	–	+
	Поточний контрольний захід	Домашня контрольна робота 2	–	+

Семестровий контроль: залік

Умови допуску до семестрового контролю:

Обов'язкові:

- Виконані тести
- Виконані домашні контрольні роботи
- Поточний рейтинг $RD \geq 30$ балів.

Необов'язкові:

- Активність на заняттях.
- Позитивний результат першої атестації та другої атестації.

² Там само.

³ Там само.

Система рейтингових балів:

1. Тести. Максимальна кількість балів – 40. Тестування за темами дисципліни здійснюється на основі тестів і залежить від тривалості контрольного заходу (5-10 хвилин). Кожний блок тестів відповідає вимогам змістової характеристики теоретичних тем.

2. Домашня контрольна робота. Максимальна кількість балів – 20.

- вичерпна відповідь – 18 – 20 балів;
- відповідь з незначними неточностями – 15-17 балів;
- неповна відповідь та незначні помилки – 9 – 14 балів;
- грубі помилки – 5-8
- незадовільна відповідь – 0 балів.

3. Залік. Максимальна кількість балів – 40.

Умовою допуску до семестрового контролю є виконання усіх поточних контрольних заходів та рейтинг більший за 30 балів. На останньому за розкладом занятті проводиться семестрова атестація у вигляді письмової залікової роботи.

Студенти, які отримали за рейтингом позитивну оцінку (набрали протягом семестру не менше ніж 60 балів ($RD \geq 30$)), можуть бути атестовані за цими балами без написання контрольної роботи.

Студенти, які отримали менше 60 балів, виконують контрольну роботу і захищають її у вигляді співбесіди. У цьому разі рейтингова оцінка складається з результатів роботи в семестрі ($RD \geq 30$ балів) та результатів контрольної роботи

Якщо залікова контрольна робота не може бути позитивно оцінена, то сумарна рейтингова оцінка залишається незмінною.

- вичерпна відповідь – 35 – 40 балів;
- відповідь з незначними помилками – 25-34 балів;
- неповна відповідь та незначні помилки – 15 – 24 балів;
- грубі помилки – 5-14
- незадовільна відповідь – 0 балів.

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

6. Додаткова інформація з дисципліни (освітнього компонента)

Комплексна робота №1.

1. Електронна пружна поляризація, модель, аналіз результатів
2. Спонтанна поляризація піроелектриків
3. Електродеградація

Комплексна робота №2

1. Іонна пружна поляризація, модель, розрахунок, аналіз результатів
2. Механізми сегнетоелектрики
3. Електронний пробій.

Комплексна робота №3.

1. Дипольна теплова поляризація, модель, аналіз результатів
2. Теплоємність діелектриків
3. Тепловий пробій

Комплексна робота №4

1. Електронна теплова поляризація, модель, аналіз результатів, приклади
2. Теплове розширення діелектриків

3. Обернений п'єзоефект

Комплексна робота №5.

1. Іонна теплова поляризація, модель, аналіз результатів, приклади
2. Пружні хвилі у діелектричних кристалах
3. Піроелектричний ефект

Комплексна робота №6

1. Дипольна теплова поляризація, модель, аналіз результатів, приклади
2. Пружна жорсткість і пружна піддатливість
3. Електрети

Комплексна робота №7.

1. Динамічні властивості пружної поляризація, приклади
2. Тензор механічних деформацій
3. Електрооптичні ефекти

Комплексна робота №8

1. Динамічні властивості теплової поляризація, приклади
2. Тензор механічних напружень
3. Фазовий перехід діелектрик-метал

Комплексна робота №9.

1. Дія на діелектрик електричного поля: загальна модель, можливі відгуки
2. Електродеградація діелектриків
3. Фазові переходи зі стрибком іонної провідності

Комплексна робота №10

1. Дія на діелектрик магнітного поля: загальна модель, можливі відгуки
2. Особливість теплового пробою
3. Сегнетоеластики

Комплексна робота №11.

1. Дія на діелектрик механічної напруги поля: загальна модель, можливі відгуки
2. Особливість електронного пробою
3. Гігантська електрострикція

Комплексна робота №12

1. Дія на діелектрик теплоти поля: загальна модель, можливі відгуки
2. Електрична міцність діелектриків
3. Електричне керування п'єзоефектом

Комплексна робота №13.

1. Природа зв'язків атомів у твердих діелектриках
2. Нелінійна провідність в умовах інжекції носіїв заряду
3. Дефекти кристалічної структури у діелектриках

Комплексна робота №14

1. Основні оптичні ефекти у діелектриках
2. Електропровідність діелектриків
3. Нелінійність діелектриків

Комплексна робота №15.

1. Порівняння властивостей діелектриків з металами
2. Поляризація сегнетоелектриків
3. Діелектричний еліпсоїд

Комплексна робота №16

1. Порівняння властивостей діелектриків з напівпровідниками
2. Діелектрична спектроскопія
3. П'єзооптика і п'єзоакустика

Комплексна робота №17.

1. Порівняння властивостей діелектриків з напівпровідниками
2. Діелектричні втрати, зумовлені пружною поляризацією
3. Сегнетоелектрики в електронних пристроях

Комплексна робота №18

1. Симетрія діелектриків кристалів та їх фізичних властивостей
2. Діелектричні втрати, зумовлені тепловою поляризацією
3. Основні застосування піроефекту

Комплексна робота №19.

1. Елементи й операції симетрії
2. Діелектричні втрати зумовлені перенесенням зарядів
3. Основні застосування п'єзоефекту

Комплексна робота №20

1. Класифікація діелектриків за їх симетрією
2. Тангенс кута діелектричних втрат
3. Діелектрики у сильних електричних полях

Фізика діелектриків, запитання до заліку

1. Загальна характеристика діелектриків

1. Як по можливості повно дати визначення діелектрика?
2. Які електричні, механічні, теплові і інші зміни можна спостерігати у діелектрику під дією на нього електричного поля?
3. Які електричні, механічні, теплові і інші зміни можна спостерігати у діелектрику під дією на нього магнітного поля?
4. Які явища виникають під впливом на діелектрик механічної напруги?
5. Які явища виникають під впливом на діелектрик зміни його температури?
6. Як впливає на діелектрик оптичне опромінювання (перелікуйте і поясніть ефекти)?
7. Які ефекти є результатом одночасної дії на діелектрик електричного поля і світла?
8. Що таке хімічний зв'язок частинок у діелектрику?
9. Перерахуйте і поясніть основні види хімічних зв'язків у діелектрику.
10. Як змінюється розподіл електронного заряду з поступовим переходом зв'язків: металічний-ковалентний-іонний?
11. В яких діелектриках домінують Ван-дер-вальсовий і водневий зв'язки?
12. Порівняйте діелектрик з металом по їх електричним, механічним і тепловим властивостям.
13. Порівняйте діелектрик з напівпровідником по їх електричним, механічним і тепловим властивостям.
14. Порівняйте заповнення зон в електронному спектрі для металів, напівметалів, напівпровідників і діелектриків.
15. Перерахуйте основні елементи й операції симетрії.
16. Як вибирати комірку Браве?
17. Опишіть основні з 32 груп точкової симетрії.
18. Чим примітні десять плоских кристалографічних груп симетрії?
19. Що таке симетрія композиційних матеріалів?
20. Чим відрізняється ефект суми от комбінаційного ефекту?

2. Електропровідність діелектриків

1. Які носії заряду характерні саме для діелектриків?
2. За яких умов існує рівноважна концентрація носіїв заряду?
3. Чим відрізняються дифузійний і стрибковий механізм переносу зарядів?
4. Як залежить від температури іонна електропровідність в діелектриках з упорядкованою і неупорядкованою структурою?
5. Як залежить від температури електронна електропровідність в діелектриках з упорядкованою і неупорядкованою структурою?
6. Чим відрізняються ефект пригнічування і нейтралізаційний ефект?
7. Чому рухливість носіїв заряду в діелектриках є невисокою?
8. Як по експериментальній залежності $j(U)$ розрізнити наявність монополярної і біполярної інжекції?
9. Коли провідність з частотою зростає і коли вона із зростанням частоти падає?
10. Як може впливати підвищена поляризуємість діелектрика на електронну і іонну електропровідність?

3. Фізичні механізми поляризації діелектриків

1. Діелектрична проникність встановлюється як із експерименту Кулона, так і із експерименту Фарадея. Покажіть сумісність цих уявлень.

2. Чому виникає і як пояснюється діелектрична нелінійність?
3. Тензорами якого рангу описується явище поляризації?
4. Які принципи покладені у класифікацію механізмів поляризації?
5. Скільки елементарних моделей поляризації розглядається у книзі?
6. Як зміниться поляризуємість електронної пружної поляризації у сильному полі? Обчислити перший коефіцієнт нелінійності α_e .
7. Як зміниться поляризуємість іонної пружної поляризації у сильному полі? Обчислити перший коефіцієнт нелінійності α_i .
8. Як зміниться поляризуємість дипольної теплової поляризації у сильному полі? Обчислити перший коефіцієнт нелінійності α_{dt} .
9. Як зміниться поляризуємість іонної теплової поляризації у сильному полі? Обчислити перший коефіцієнт нелінійності α_{it} .
10. Перелікувати і пояснити оптичні ефекти в анізотропному діелектрику.
11. Які оптичні ефекти залежать від інтенсивності світла?
12. В яких діелектриках зустрічається дипольна поляризація?
13. В яких діелектриках зустрічається електронна теплова поляризація?
14. Яка модель пояснює іонну теплову поляризацію?
15. Якими є обмеження для застосування рівняння Коаузіуса-Мосотті-Лорентца?
16. На які технічні параметри діелектричних пристроїв впливає міграційна поляризація?

4. Динаміка встановлення різних механізмів поляризації

1. Представити у різних координатах і проаналізувати залежність компонент $\epsilon^*(\omega)$, що описуються рівнянням Дебая.
2. Пояснити фізичну природу часу релаксації.
3. Яка модель і рівняння описують дисперсію $\epsilon^*(\omega)$ для електронної поляризації?
4. Яка модель і рівняння описують дисперсію $\epsilon^*(\omega)$ для іонної поляризації?
5. У чому схожість і різниця акустичних і оптичних фононів?
6. Проведіть графічний аналіз дисперсійного рівняння Лорентца.
7. Виведіть і поясніть співвідношення Ліддейна–Сакса–Теллера
8. Які характерні риси і описання властивостей параелектриків?
9. Наведіть приклади практичного використання пара електриків.
10. Як створити термостабільні діелектрики?
11. Наведіть приклади частотної і температурної залежності ϵ напівпровідників.
12. Навіщо у мікроелектронних приладах потрібно підвищувати ϵ діелектричних прошарків?
13. Перелікуйте основні механізми створення електретів.
14. Що таке і де використовується термостимульована деполізація?

5. Діелектричні втрати і діелектрична спектроскопія

1. Що характеризують діелектричні втрати?
2. Назвіть три основних параметри, що описують діелектричні втрати.
3. Які основні механізми діелектричних втрат?
4. Як математично і графічно описуються діелектричні втрати від провідності?
5. Як математично і графічно описуються діелектричні втрати від релаксаційної поляризації?
6. Як математично і графічно описуються діелектричні втрати від резонансної поляризації?
7. Що таке діелектричний спектр? Назвіть його характеристики.
8. Поясніть різницю між «істиною» і «ефективною» діелектричною проникністю.
9. Порівняйте моделі «паралельно» та «послідовно» включених компонентів неоднорідних діелектриків.
10. Наведіть опис характеристик статистичних і матричних сумішей.

6. Електромеханічні властивості діелектриків

1. Перерахуйте і поясніть основні механічні властивості діелектриків.
2. Які тензорні параметри входять у закон Гука?
3. Перелікуйте основні напружені стани.
4. Які типи деформацій вам відомі? Яка розмірність деформації?
5. Як співвідносяться пружна жорсткість і пружна піддатливість?
6. Як співвідносяться об'ємна стискальність, об'ємний модуль і коефіцієнт Пуассона?

7. Перелікуйте і поясніть основні об'ємні і поверхневі пружні хвилі.
8. В яких діелектриках спостерігається п'єзоелектричний ефект?
9. Поясніть геометрично (на рисунках) різницю прямого і оберненого п'єзоэффекту.
10. Перелікуйте основні граничні умови дослідження п'єзоэффекту.
11. Представте матрицю компонентів п'єзомодуля кварцу.
12. Поясніть геометрично поздовжній, поперечний і зсувний п'єзоелектричні ефекти.
13. Нарисуйте «п'єзоелектричний квадрат» і поясніть ефекти у ньому.
14. Як відрізняється діелектрична проникність механічно вільного і затиснутого п'єзоелектрика?
15. Що таке коефіцієнт електро механічного зв'язку?
16. Що таке і як математично і графічно описується електрострикція?
17. Поясніть фізичну природу електричного керування п'єзоэффектом.

Запитання до розділу 7. Електротеплові властивості діелектриків

1. Перелікуйте і поясніть основні термодинамічні характеристики.
2. Поясніть різницю між ентальпією і вільною енергією Гіббса.
3. Як модельно описується теплове розширення діелектриків?
4. Опишіть особливості тензору термічного розширення.
5. Поясніть закон сталості теплоємності.
6. У чому полягає модель Ейнштейна для опису теплоємності?
7. У чому полягає модель Дебая для опису теплоємності?
8. У чому полягає модель Борна для опису теплоємності?
9. Що таке коефіцієнт теплопровідності?
10. Які основні механізми переносу теплової енергії в діелектриках?
11. Що таке піроелектрик? Яка симетрія піроелектричних матеріалів?
12. Наведіть і поясніть модель піроелектричного ефекту.
13. Чим пояснюється різниця між ізотермічною і адіабатичною діелектричною проникністю?

8. Природа спонтанної поляризації

1. Спільне і різне у ряду «сегнетоелектрик-піроелектрик-електрет-п'єзоелектрик».
2. Проведіть класифікацію електричних-механічних-теплових ефектів у полярних діелектриках.
3. Що вказує на зв'язок піроелектричних і п'єзоелектричних властивостей?
4. Які основні електричні властивості сегнетоелектриків?
5. Наведіть модельне представлення сегнетоелектрики.
6. Які ви знаєте основні сегнетоелектрики?
7. Чому виникає і як використовується доменна структура сегнетоелектриків?
8. Що відрізняє антисегнетоелектрики і сегнетоеластики
9. Як описується і використовується нелінійність сегнетоелектриків?
10. Як описується і використовується нелінійність парелектриків?

9. Фазові переходи у діелектриках

1. Що таке фаза?
2. Наведіть приклади фазових переходів зі зміною агрегатного стану.
3. Які основні особливості фазових переходів першого роду?
4. Які основні особливості фазових переходів другого роду?
5. Наведіть приклади параметрів порядку для фазових переходів у кристалах.
6. Як реалізується теорія Ландау для опису сегнетоелектричних переходів другого роду?
7. Як реалізується теорія Ландау для аналізу сегнетоелектричних переходів першого роду?
8. Що таке морфотропні переходи на границі антисегнетоелектричної і сегнетоелектричної фаз? Де ці матеріали знаходять впровадження?
9. Опишіть розмитий фазовий перехід у релаксорах.
10. Опишіть фазові переходи з аномалією електронної електропровідності.
11. Опишіть фазові переходи з аномалією іонної електропровідності.
12. Як пояснюється позисторний ефект у сегнето-напівпровідниках.
13. Наведіть класифікацію рідких кристалів.

10. Електрична міцність діелектриків

1. Що означає поняття «електрична міцність»?
2. Опишіть основний фізичний механізм першої стадії пробою.
3. Які визначальні особливості пробою газів, рідин і твердих діелектриків?
4. Як залежить електрична міцність від часу експозиції?
5. За яких умов розвивається однолавінний пробій?
6. За яких умов розвивається багатолавинний пробій?
7. Опишіть основні механізми Таунсендівської теорії пробою.
8. Опишіть механізм стримірної теорії пробою.
9. Коли спостерігається оптичний пробій?
10. За якими механізмами реалізується пробій рідких діелектриків?
11. Наведіть основні характеристики електронного пробою.
12. Яку роль відіграє електрон-фононна взаємодія у механізмі пробою кристалів?
13. Чим пояснюється висока електрична міцність тонких плівок?
14. Наведіть основні характеристики електротеплового пробою.
15. Що таке електротермомеханічний пробій?
16. Чим визначається довговічність неорганічного діелектрика у разі електрохімічного пробою?
17. Чим визначається довговічність полімерного діелектрика у разі електрохімічного пробою?
18. Які механізми радіаційного пошкодження органічних діелектриків?
19. Які механізми радіаційного пошкодження неорганічних діелектриків?

Робочу програму навчальної дисципліни (силабус) "Функціональні діелектрики в електроніці":

Складено професором, докт. фіз.-мат. наук Поплавко Юрієм Михайловичем

Ухвалено кафедрою мікроелектроніки (протокол № 27 від 21.06.2024)

Погоджено Вченою радою ФЕЛ (протокол № 06/2024 від 27.06.2024)