

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО РАДІОЕЛЕКТРОННОЇ АПАРАТУРИ-1 ЛАБОРАТОРНИЙ ПРАКТИКУМ

*Рекомендовано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
як навчальний посібник для студентів,
які навчаються за спеціальністю 172 «Телекомунікації та радіотехніка»,
спеціалізацією «Інформаційно-обчислювальні засоби електронних систем»*

Київ
КПІ ім. Ігоря Сікорського
2019

Матеріалознавство радіоелектронної апаратури-1. Лабораторний практикум [Електронний ресурс]: навч. посіб. для студ. спеціальності 172 «Телекомунікація та радіотехніка», спеціалізації «Інформаційно-обчислювальні засоби електронних систем» / КПІ ім. Ігоря Сікорського ; укладачі: А.П. Мірошніченко, Г. В. Іваннік. – Електронні текстові данні (1 файл: 1,34 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – 65 с.

Гриф надано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського (протокол №_9_ від 30.05_.2019 р.) за поданням Вченої ради факультету електроніки (протокол №_8_від 26.05.2019 р.)

Електронне мережне навчальне видання

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО РАДІОЕЛЕКТРОННОЇ АПАРАТУРИ-1 ЛАБОРАТОРНИЙ ПРАКТИКУМ

Укладачі: *Мірошніченко Анатолій Петрович, канд. техн. наук, доц.
Іваннік Геннадій Васильович, канд. техн. наук, асистент*

Відповідальний редактор *Кучернюк П.В., канд. техн. наук, доц.*

Рецензент: *Орлов А.Т., канд. техн. наук, проф.*

ЗМІСТ

Вступ	4
1. Лабораторна робота 1-1. Вивчення особливостей електропровідності діелектричних матеріалів.....	7
2. Лабораторна робота 1-2. Вивчення діелектричної дисперсії в діапазоні радіочастот	14
3. Лабораторна робота 1-3. Вивчення основних механізмів діелектричних втрат	23
4. Лабораторна робота 1-4. Визначення ефективних параметрів неоднорідних діелектриків	34
5. Лабораторна робота 1-5. Визначення основних характеристик та параметрів п'єзокерамічних діелектриків.....	44
6. Лабораторна робота 1-6. Дослідження фазових переходів та діелектричних характеристик сегнетоелектриків.....	52
7. Лабораторна робота 1-7. Вивчення основних характеристик нелінійних діелектриків.....	59
Література	65

Вступ

Дисципліна "Матеріалознавство радіоелектронної апаратури" відноситься до циклу предметів професійної та практичної підготовки і має чітку направленість на здобуття студентами знань в галузі властивостей та основних напрямків використання сучасних матеріалів електронної техніки, умінь та навичок у дослідженні і розрахунку їх параметрів.

Лабораторний цикл повинен навчити студентів встановлювати зв'язок між будовою матеріалів та їх властивостями з одного боку, та між параметрами матеріалів і характеристиками компонентів радіо електронної апаратури, – з другого. При цьому основна увага у циклі лабораторних робіт приділяється діелектричним, напівпровідниковим, провідниковим та магнітним матеріалам, їх основним електрофізичним властивостям.

При виконанні експериментальних досліджень студентам необхідно перш за все розібратися у фізичній суті явищ, що вивчаються, ознайомитись з методикою проведення дослідження та експериментальним устаткуванням. Отримані результати повинні бути всебічно проаналізовані на відповідність теоретичним положенням та нормативним і довідниковим значенням.

Кількість лабораторних робіт та завдання до них можуть бути скореговані викладачем залежно від кількості годин, відведених у робочому навчальному плані на лабораторні заняття.

Загальні вимоги до студентів при виконанні лабораторних робіт

1. Лабораторні роботи виконуються студентами відповідно до графіка виконання робіт (графік встановлюється окремо для кожного потоку).

2. До виконання лабораторної роботи допускаються студенти, які прослухали інструктаж з техніки безпеки, підготували протокол лабораторної роботи і мають знання, достатні для виконання роботи.

3. Вмикання напруги на робочому місці проводиться тільки з дозволу викладача.

4. Студенти, які не виконали лабораторні роботи згідно з графіком, можуть ліквідувати заборгованість тільки за додатковим графіком, єдиним для всіх студентів потоку.

5. Звіт із лабораторної роботи оформлюється кожним студентом самостійно і включає:

а) титульний аркуш з назвою дисципліни, назвою та номером лабораторної роботи, прізвищем студента, та датою виконання роботи;

б) мету роботи;

в) основні теоретичні положення (визначення явищ, параметрів, теоретичні формули, типові характеристики);

г) завдання до лабораторної роботи;

д) відомості про об'єкти дослідження (хімічна формула, марка матеріалу, геометричні розміри тощо);

е) методику проведення дослідження (включаючи схему вимірювань, блок-схеми, типи приладів, розрахункові співвідношення);

є) таблиці даних, з усіма результатами вимірів та розрахунків;

ж) графічний матеріал, виконаний вручну на міліметровці (або з дозволу викладача за допомогою електронних засобів), згідно з вимогами до графічного матеріалу НДР;

з) висновки по роботі (повинні містити у собі інформацію про виконання пунктів завдання, перелік отриманих результат та їх аналіз).

Звіт з лабораторної роботи по п. а; б; в, повинен бути підготовлено і представлено викладачу перед початком відповідної лабораторної роботи.

6. Лабораторна робота вважається виконаною студентом лише в тому разі, якщо він провів дослідження, підготував повний звіт по роботі та захистив його.

7. Захист кожної лабораторної роботи провадитися на наступному після її виконання занятті. Студенти, які мають більше ніж дві заборгованості із захисту робіт, до виконання наступних робіт не допускаються.

Лабораторна робота № 1-1
Вивчення особливостей електропровідності
діелектричних матеріалів.

Мета роботи: визначення об'ємного та поверхневого питомого опору діелектричних матеріалів, дослідження температурної залежності електропровідності діелектричних матеріалів.

Теоретична частина

Густина струму (**J**), що протікає крізь діелектрик у результаті дії на нього електричного поля $\vec{E}$, складається з густини струму зміщення ($\frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}$) та густини струму електропровідності ($\gamma \mathbf{E}$):

$$\mathbf{J} = \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} + \gamma \mathbf{E}, \quad (1.1)$$

γ - питома об'ємна електропровідність, [См/м];

D - електрична індукція, [Кл/м²] ; **D** = $\epsilon \epsilon_0 \mathbf{E}$.

Якщо у діелектрику мають місце тільки швидкі види поляризації, то струм зміщення швидко зменшується до нуля і через діелектрик протікає тільки струм електропровідності. При цьому необхідно відрізнити об'ємну (визначається будовою матеріалу) та поверхневу (визначається будовою матеріалу та станом його поверхні) електропровідність.

У твердих діелектричних матеріалах об'ємна електропровідність може мати як іонний, так і електронний характер. Іонна електропровідність, має місце при відносно низьких температурах і пов'язана як з дефектами структури, так і з активацією власних іонів. Електронна електропровідність діелектричних матеріалів має місце, як правило, тільки при дуже високих температурах або високій

напруженості електричного поля.

Питома об'ємна електропровідність, яка визначається як відношення модулю густини струму до модулю напруженості електричного поля $\gamma = \frac{j}{E}$, може бути записана через основні параметри носіїв заряду $\gamma = q n \mu$ (де q - заряд носія [Кл], n - концентрація носіїв [$\frac{1}{m^3}$], μ рухливість носіїв [$\frac{m^2}{Vs}$]).

Концентрація вільних носіїв заряду експоненціально залежить від температури:

$$n = n_0 \exp\left(-\frac{W}{2kT}\right), \quad (1.2)$$

де W – енергія активації носія заряду, k – константа Больцмана,

$$k = 1,38 \cdot 10^{-23} \frac{Дж}{К^4}; \quad T - \text{термодінамічна температура } [K^0].$$

Нехтуючи більш слабкою залежністю рухливості носіїв від температури, і враховуючи загальну форму запису для електропровідності: $\gamma = q n \mu$ отримаємо

$$\gamma = \gamma_0 \exp\left(-\frac{W}{kT}\right), \quad (1.3)$$

Якщо електропровідність зумовлена декількома типами носіїв заряду,

то

$$\gamma = \sum_{i=1}^n \gamma_i. \quad (1.4)$$

З виразу 1.3 видно, що при одному типі носіїв температурна залежність електропровідності побудована в координатах $\ln \gamma$ від $\frac{1}{T}$, має вигляд прямої лінії, нахил якої визначається енергією активації цього типу носіїв (Рис.1.1, а), якщо ж типів носіїв декілька, то залежність буде мати вигляд ламаної, кожен з відрізків якої відноситься до певного типу

носіїв (Рис.1.1,б).

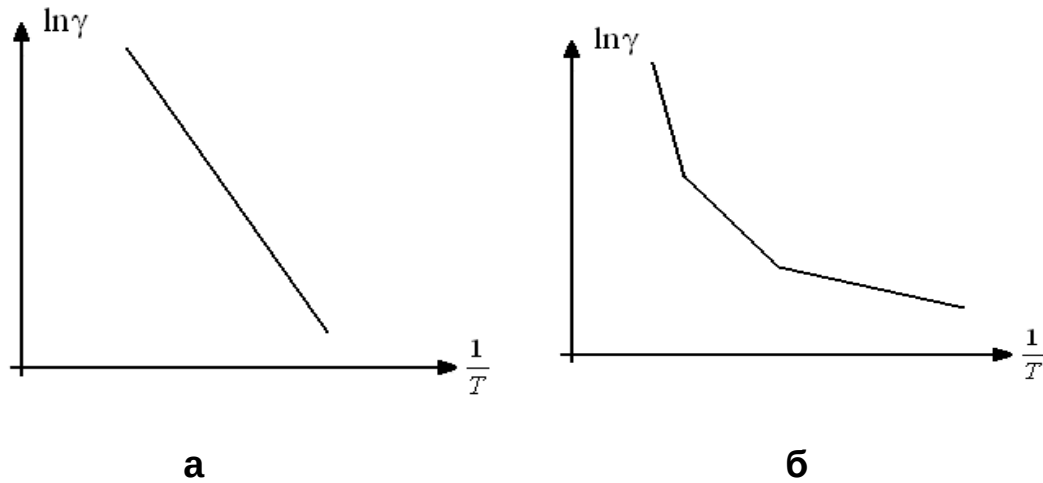


Рис.1-1. Залежність електропровідності діелектрика від температури

Якщо питомий опір при об'ємній електропровідності визначається

відомою формулою $\rho_v = \frac{RS}{\ell}$ (де R – об'ємний опір діелектричного зразка, S - площа електродів а ℓ - відстань між ними) і має розмірність [Ом м], то питомий поверхневий опір визначається за формулою

$$\rho_s = \frac{R_s d}{\ell} \quad (\text{відповідно до Рис.1-2}) \quad \text{і має розмірність [Ом]}$$

(в мікроелектронній техніці прийнято розмірність «Ом на квадрат» $[\frac{\text{Ом}}{\square}]$

, це зумовлено тим, що при $\ell = d$, поверхня має квадратну форму, і $\rho_s = R_s$, такий підхід спрощує розрахунок інтегральних резисторів).

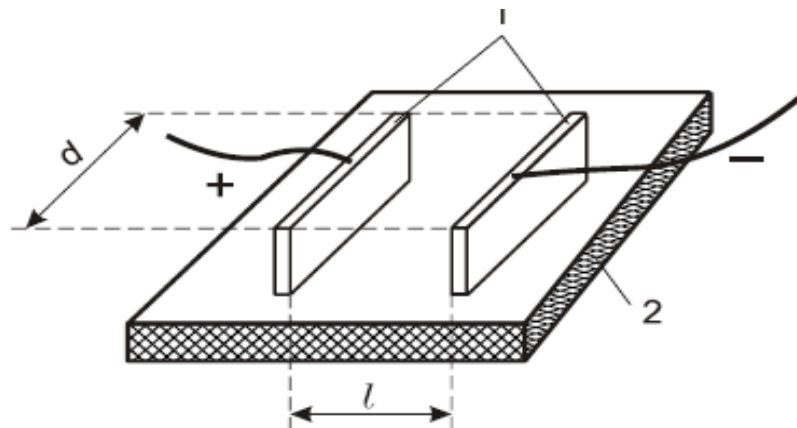
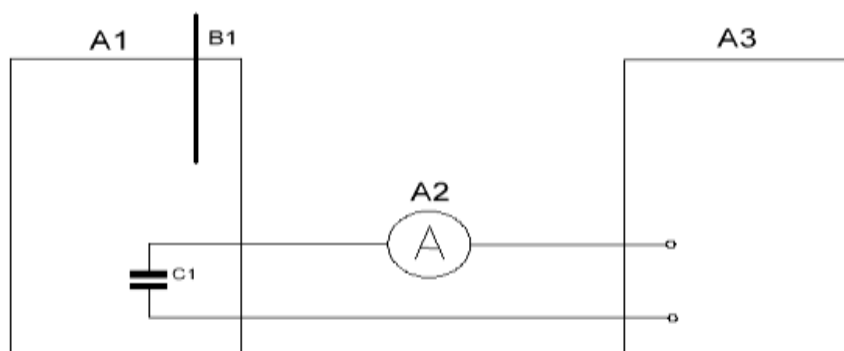


Рис.1-2. Схема визначення поверхневого опору (1-електроди, 2- діелектричний зразок).

У діелектричних матеріалах із сегнетоелектричними властивостями об'ємна електропровідність різко зменшується при підвищенні температури поблизу фазового переходу, що пов'язано з перебудовою структури речовини. Такий ефект носить назву "позисторного ефекту", а матеріали, в яких він спостерігається – "позисторами".

Експериментальне обладнання та методика дослідження

Для дослідження електропровідності діелектричних матеріалів можуть використовуватись як спеціальні вимірювальні схеми з прямим або непрямым виміром електричного опору, так і установки для комплексного дослідження електропровідності. В залежності від величини опору діелектричних зразків та діапазонів вимірювання приладів для визначення опорів можуть використовуватись омметри типу Щ63, тераомметри типу Е 6-13, сучасні прилади, такі як СА6545 , Keythley 6517B Electrometer/High Resistance Meter, або схеми які дозволяють вимірювати струм, що протікає крізь діелектрик при заданій електричній напрузі (див. Рис. 1-3).



A1 - термошафа

A2 - вимірювач струму

A3 - джерело живлення постійного струму

B1 - термометр

C1 - досліджуваний зразок

Рис.1-3. Схема вимірювань

Для виміру об'ємного та поверхневого опору твердих діелектриків зазвичай використовують трьохелектродну схему вимірювань, наведену на рис.1-4.

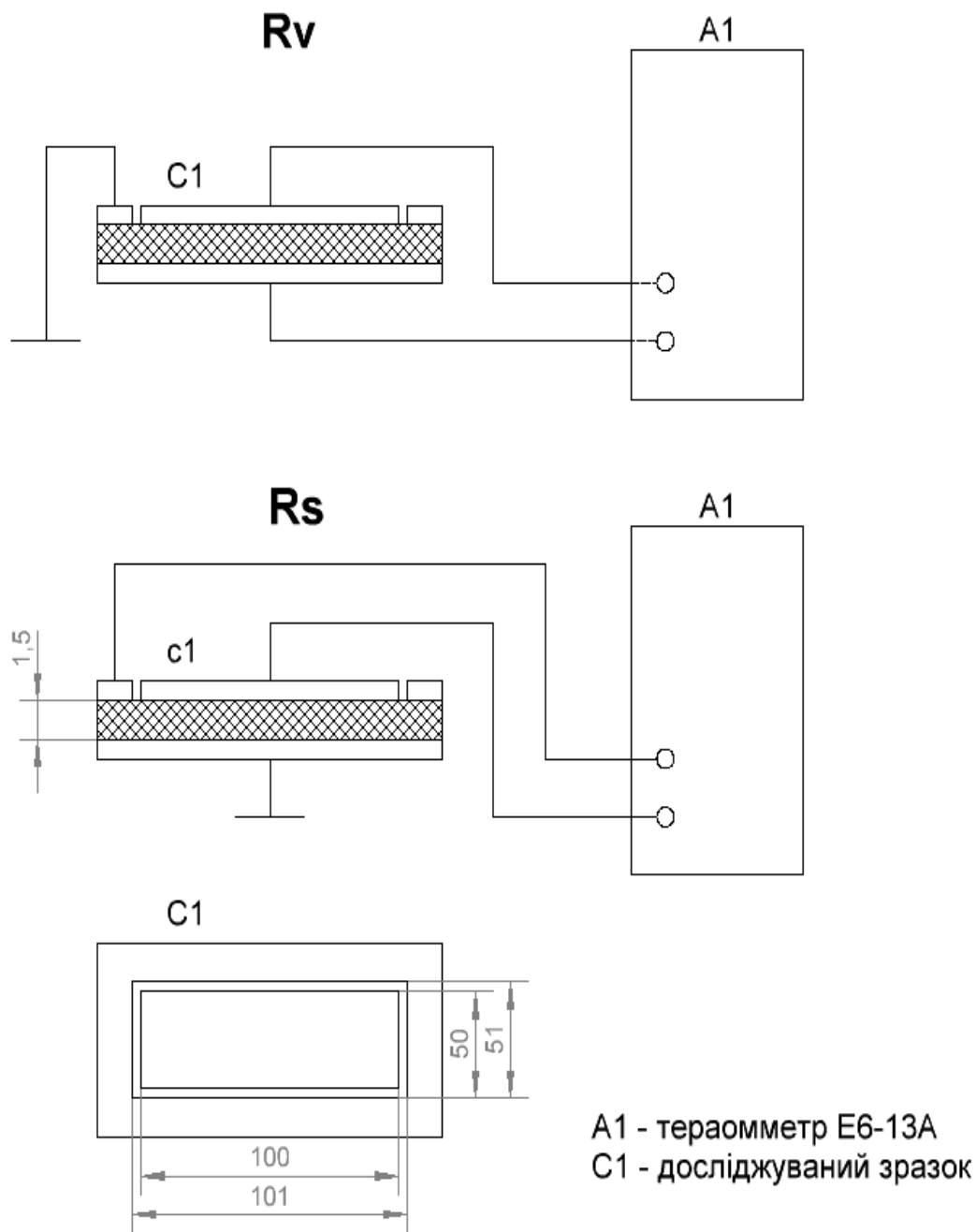


Рис.1-4. Схема вимірювань

Опис схем або установок для проведення дослідження конкретних зразків матеріалів, додаткові методичні вказівки щодо проведення дослідження студенти отримують від викладача безпосередньо на лабораторному занятті.

Завдання

1. Ознайомитися з устаткуванням та методикою експериментального дослідження.
2. Ознайомитися з дослідними зразками.
3. Заміряти об'ємний та поверхневий опір діелектричного зразку, обчислити питомий об'ємний та поверхневий опір матеріалу. Схема вимірювань на рис.1-4.
3. Дослідити залежності об'ємного опору зразків діелектричних матеріалів від температури у заданому діапазоні температур. Схема вимірювань на рис.1-3.
4. Обчислити за експериментальними даними та побудувати залежності питомого об'ємного опору матеріалів від температури.
5. Для вказаних викладачем зразків обчислити та побудувати температурні залежності питомої електропровідності матеріалів в координатах $\ln \gamma$ від $1/T$, та розрахувати енергію активації носіїв заряду.
6. Зробити висновки по роботі.

Література

- [1] с. 193-200;
- [3] с. 76-105 ;
- [4] с. 103-109;
- [5] с. 51-56;

Додаткова інформація

а) Значення питомого поверхневого та об'ємного опору деяких

діелектричних матеріалів

Параметр	Матеріал				
	Полі- етилен	Поліхлор- вініл	Скло- текстоліт	Гетинакс	Конденсаторна кераміка
ρ_v [Омм]	$\sim 10^{15}$	$> 10^{14}$	$> 10^7$	$> 10^6$	$> 10^8$
ρ_s [Ом]	$\sim 10^{15}$	$> 10^8$	$> 10^9$	$> 10^8$	$> 10^8$

б) Питання для самоконтролю студентів

1. Електропровідність матеріалів. Визначення.
2. Які струми протікають в діелектрику?
3. Природа струму зміщення та струму електропровідності у діелектрику.
4. Які основні носії заряду у діелектриках?
5. Які фактори, що впливають на електропровідність діелектриків?
6. Чим зумовлена поверхнева електропровідність діелектриків?
7. Яка розмірність об'ємного питомого опору діелектрика?
8. Яка розмірність поверхневого питомого опору діелектрика?
9. Чим обумовлено зростання електропровідності діелектриків при зростанні температури?
10. При яких умовах електронна складова електропровідності діелектриків стає суттєвою?

Лабораторна робота № 1-2

Вивчення діелектричної дисперсії в діапазоні радіочастот

Мета роботи: експериментально дослідити частотну залежність відносної діелектричної проникності $\epsilon'(\omega)$, коефіцієнту діелектричних втрат $\epsilon''(\omega)$ та тангенсу кута діелектричних втрат $\text{tg}\delta(\omega)$ матеріалу, визначити вид діелектричної дисперсії та її параметри.

Теоретичний розділ

Дослідження діелектричних спектрів, тобто залежності комплексної діелектричної проникності $\epsilon^*(\omega) = \epsilon'(\omega) - i\epsilon''(\omega)$ є одним з основних методів вивчення властивостей діелектричних матеріалів. Це пов'язано з тим, що частотні залежності $\epsilon'(\omega)$, $\epsilon''(\omega)$, $\text{tg}\delta(\omega)$ дозволяють не тільки якісно оцінювати механізми поляризації та діелектричних витрат, але і отримувати інформацію про особливості будови речовини, визначати деякі мікроскопічні параметри.

Перш ніж розглянути теоретичні положення та співвідношення, згадаємо основні поняття та визначення.

Діелектрична дисперсія – явище зміни відносної діелектричної проникності (ϵ') при зміні частоти електричного поля.

Розрізняють два основних види діелектричної дисперсії.

Резонансна діелектрична дисперсія – діелектрична дисперсія, при якій у частотній характеристиці відносної діелектричної проникності мають місце як ділянки зниження, так і ділянки підвищення.

Релаксацийна діелектрична дисперсія – діелектрична дисперсія, при якій відносна діелектрична проникність монотонно знижується з підвищенням частоти.

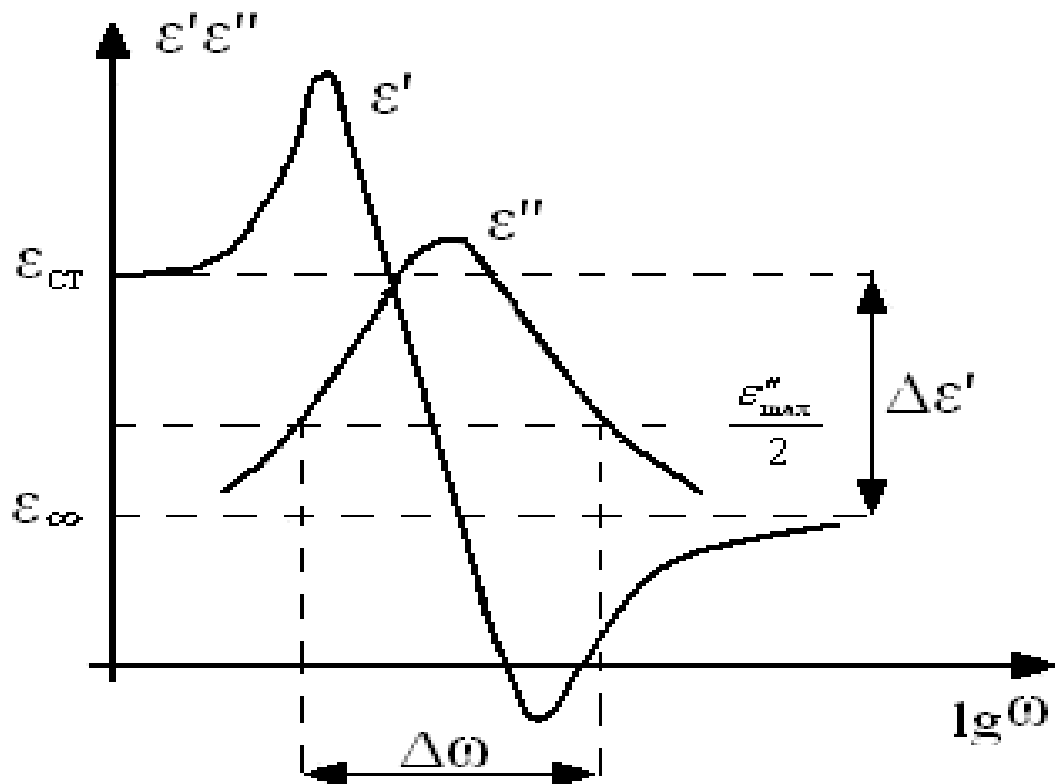
Параметри діелектричної дисперсії:

- частота діелектричної дисперсії – частота діючого на діелектрик електричного поля, при якій абсолютне значення похідної відносної діелектричної проникності по частоті має

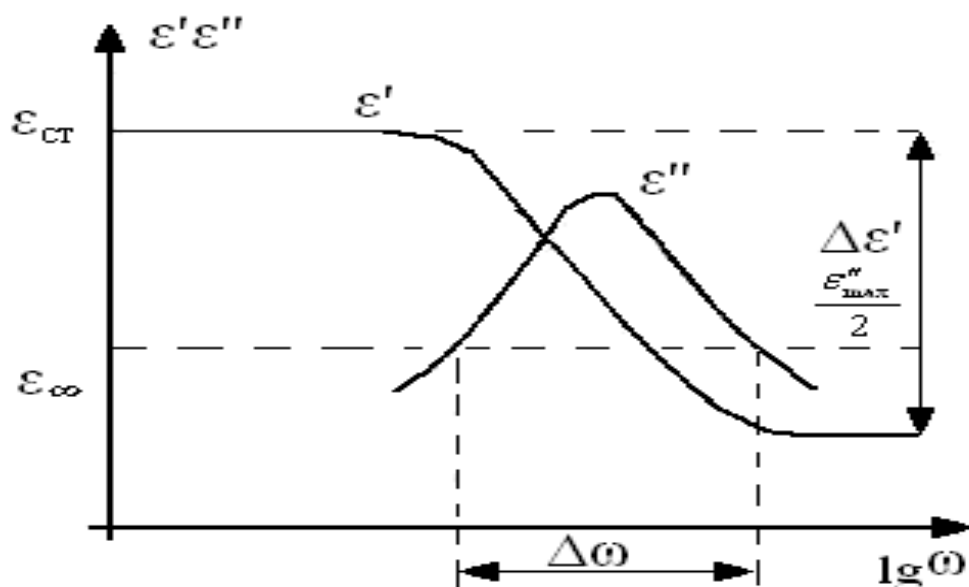
максимальне значення;

- глибина діелектричної дисперсії – величина, яка дорівнює різниці значень відносної діелектричної проникності на частотах початку та закінчення діелектричної дисперсії;
- ширина діелектричної дисперсії – величина, яка дорівнює різниці частот, при яких коефіцієнт діелектричних втрат ϵ'' дорівнює половині свого максимального значення.

На рис.2-1. зображені якісні залежності $\epsilon'(\omega)$, $\epsilon''(\omega)$ для резонансної (а) та релаксаційної (б) дисперсії і вказано їх параметри.



а



б

Рис.2-1.

Математичні вирази, які описують резонансну та релаксаційну дисперсію, отримують в результаті аналізу динамічних властивостей простих моделей для "сильно" та "слабко" зв'язаних частинок діелектрика.

Для резонансної дисперсії може бути отриманий такий математичний вираз (рівняння Друде – Лоренца):

$$\epsilon^*(\omega) = \epsilon_{\infty} + \frac{\epsilon_{ст} - \epsilon_{\infty}}{1 - \omega^2/\omega_0^2 + i\Gamma\omega/\omega_0}, \quad (2.1)$$

де ϵ_{∞} - відносна діелектрична проникність, зумовлена більш швидкими видами поляризації;

$\epsilon_{ст}$ - відносна діелектрична проникність на низькій частоті;

ω_0 - частота власних коливань «сильно» (пружно) зв'язаної частинки;

Γ - параметр, що характеризує відносне затухання коливань та пов'язаний з втратами енергії.

Враховуючи, що $\epsilon^*(\omega) = \epsilon'(\omega) - i\epsilon''(\omega)$, маємо

$$\epsilon'(\omega) = \epsilon_\infty + \frac{(\epsilon_{ст} - \epsilon_\infty)(1 - \omega^2 / \omega_0^2)}{(1 - \omega^2 / \omega_0^2)^2 + \Gamma^2 \omega^2 / \omega_0^2} \quad (2.2)$$

$$\epsilon''(\omega) = \frac{(\epsilon_{ст} - \epsilon_\infty)\Gamma \omega^2 / \omega_0^2}{(1 - \omega^2 / \omega_0^2)^2 + \Gamma^2 \omega^2 / \omega_0^2} \quad (2.3)$$

Аналіз частотної залежності $\epsilon'(\omega)$ показує що вона відповідає визначенню резонансної діелектричної дисперсії.

Використовуючи модель "слабко" зв'язаної частинки можна отримати такий математичний вираз (дисперсійна формула Дебая).

$$\epsilon^*(\omega) = \epsilon_\infty + \frac{\epsilon_{ст} - \epsilon_\infty}{1 + i\omega\tau} \quad (2.4)$$

З виразу (2.2) можна легко отримати подальші формули для ϵ' , ϵ'' та $\text{tg}\delta$:

$$\epsilon'(\omega) = \epsilon_\infty + \frac{\epsilon_{ст} - \epsilon_\infty}{1 + \omega^2 \tau^2}; \quad (2.5)$$

$$\epsilon''(\omega) = \frac{(\epsilon_{ст} - \epsilon_\infty) \omega \tau}{1 + \omega^2 \tau^2}; \quad (2.6)$$

$$\text{tg}\delta(\omega) = \frac{\epsilon''}{\epsilon'} = \frac{(\epsilon_{ст} - \epsilon_\infty) \omega \tau}{\epsilon_{ст} + \epsilon_\infty \omega^2 \tau^2}. \quad (2.7)$$

Параметр τ в (2.4) - (2.7) має назву час релаксації і визначається висотою потенціального бар'єра релаксатора U та температурою T :

$$\tau = \frac{1}{2\nu} \exp\left(\frac{U}{kT}\right). \quad (2.8)$$

де ν - частота теплових коливань "слабко" зв'язаної частинки,

U - висота потенційного бар'єру,

k - константа Больцмана.

Аналіз частотної залежності $\epsilon'(\omega)$ показує що вона відповідає визначенню релаксаційної діелектричної дисперсії. При цьому, як впливає з формул 2.6 – 2.7, $\epsilon''(\omega)$ досягає свого максимального

значення ($\epsilon''_{\text{макс}}(\omega) = \frac{\epsilon_{\text{ст}} - \epsilon_{\infty}}{2}$) на частоті $\omega = \frac{1}{\tau}$. Відповідно залежність

$\text{tg}\delta(\omega)$ досягає свого максимального значення ($\text{tg}\delta_{\text{макс}}(\omega) = \frac{\epsilon_{\text{ст}} - \epsilon_{\infty}}{2\sqrt{\epsilon_{\text{ст}}\epsilon_{\infty}}}$)

на частоті $\omega = \frac{1}{\tau} \sqrt{\frac{\epsilon_{\text{ст}}}{\epsilon_{\infty}}}$.

Слід відзначити, що при наявності у діелектрику одного типу релаксаторів (і відповідно одного часу релаксації) зв'язок між ϵ' та ϵ'' встановлюється рівнянням

$$\left(\epsilon' - \frac{\epsilon_{\text{ст}} + \epsilon_{\infty}}{2} \right)^2 + \epsilon''^2 = \left(\frac{\epsilon_{\text{ст}} - \epsilon_{\infty}}{2} \right)^2, \quad (2.9)$$

графічним зображенням якого є півколо з центром на осі ϵ' , як це показано на рис.2.2. (Діаграма Коул-Коул).

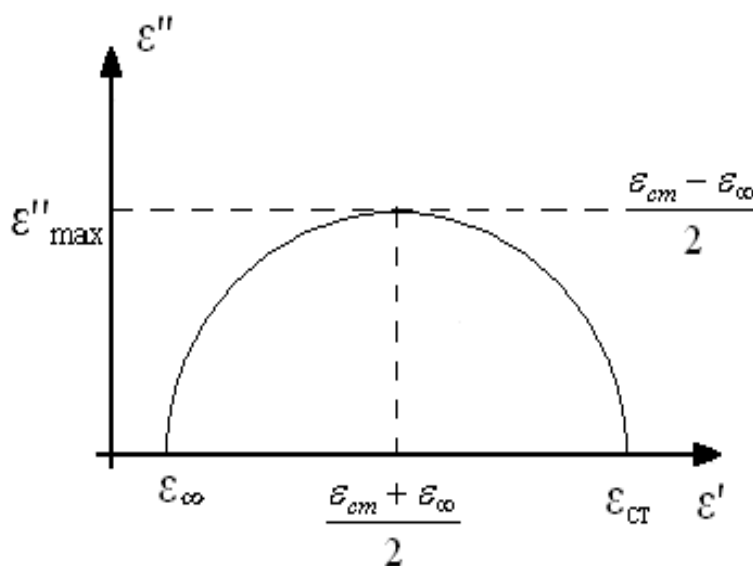
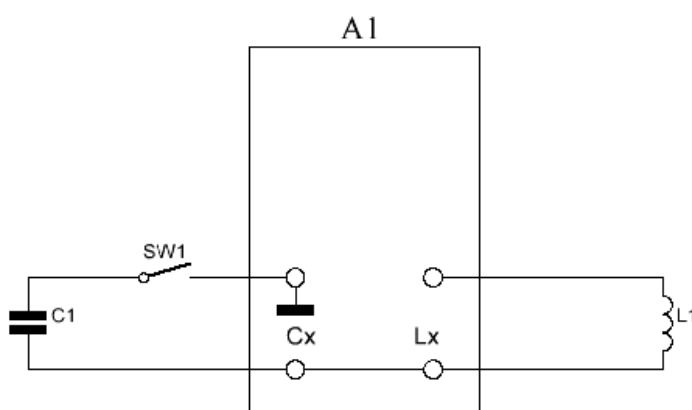


Рис.2-2.

Експериментальне обладнання та методика дослідження

Основною апаратурою для проведення дослідження в широкому діапазоні частот є резонансні вимірювачі добротності. В разі проведення дослідження вимірювачем добротності ВМ-560 слід мати на увазі наступне. Дослідження здебільшого проводиться на зразках ємністю менше за 425 пФ тому використовується наведена нижче схема підключення зразка до клем вимірювача (рис.2-3).



A1 - вимірювач добротності BM560 TESLA

C1 - досліджуваний зразок

L1 - катушка індуктивності, входить до складу приладу BM560 TESLA

Рис.2-3. Схема вимірювань

Для вимірювання ємності досліджуваного зразка C_x (якщо вона менше за 425 пФ) та його добротності Q_x рекомендується дотримуватись наступної послідовності дій:

1. Встановіть частоту, на якій потрібно проводити вимірювання.
2. З комплекту котушок індуктивності підберіть таку, яка відповідає вибраному діапазону частот. і підключіть її до клем L_x .

3. Налаштуйте вимірювальний контур в резонанс і запишіть отримані величини Q_1 і C_1 .
4. До клем C_x підключіть досліджуваний зразок, знову налаштуйтеся в резонанс і визначте нові значення Q_2 і C_2 .
5. Встановіть нову частоту вимірювання та виконайте п.2 – 5

Розрахунок $C_x, Q_x, \text{tg } \delta, \epsilon', \epsilon''$ для кожного значення частоти провадиться за наступними формулами:

$$C_x = C_1 - C_2;$$

$$Q_x = \frac{|C_1 - C_2| \cdot Q_1 \cdot Q_2}{(Q_1 - Q_2) \cdot (C_1 + C_0)}, \text{ де } C_0 - \text{ власна ємність котушки індуктивності.}$$

$$\text{tg} \delta = \frac{1}{Q_x},$$

$$\epsilon'(f) = \frac{C_x \cdot d}{\epsilon_0 \cdot S}, \text{ де } d - \text{ товщина діелектрика, м; } S - \text{ площа електродів,}$$

м^2 (цю інформацію студенти отримують у викладача безпосередньо на лабораторній роботі).

$$\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{\Phi}{\text{м}},$$

$$\epsilon'' = \epsilon' \cdot \text{tg} \delta.$$

Результати всіх вимірювань та розрахунків необхідно звести у єдину Таблицю (можливий варіант такої Таблиці наведено у Додатковій інформації до лабораторної роботи).

У випадку необхідності дослідження зразків з ємністю більше за 425 пФ слід додатково скористатися методикою дослідження наведеною у Лабораторній роботі 1-3.

Завдання

1. Ознайомитися з устаткуванням, методикою експериментального дослідження та зібрати схему вимірювань (рис.2-3).
2. Ознайомитися з дослідними зразками.
3. Провести експериментальне дослідження та виконати розрахунки параметрів діелектричного матеріалу (ϵ' , ϵ'' , $\text{tg } \delta$) у заданому діапазоні частот.
4. Занести результати всіх вимірювань та розрахунків у Таблицю.
5. За результатами розрахунків визначити вид діелектричної дисперсії.
 - 5.1 Побудувати на одному графіку залежності $\epsilon'(f)$ та $\epsilon''(f)$ для випадку резонансної дисперсії.
 - 5.2 Побудувати на одному графіку залежності $\epsilon'(f)$, $\epsilon''(f)$ та $\text{tg}\delta(f)$ для випадку релаксаційної дисперсії.
6. Визначити та вказати на графіках параметри діелектричної дисперсії.
7. У випадку релаксаційної дисперсії побудувати діаграму Коул - Коул.
8. Зробити висновки по роботі.

Література

- [2] с. 109-117.
- [3] с. 212-220.
- [5] с. 22-29. 33-42;
- [8]

Додаткова інформація

а) Приклад Таблиці для занесення експериментальних та розрахункових даних.

№	f, кГц	C ₁ , pF	Q ₁	C ₂ , pF	Q ₂	C _x =C ₁ -C ₂ , pF	ε'(f)	Q _x	tgδ(f)	ε''(f)
1										
2										
...										
n										

б) Питання для самоконтролю студентів

1. Що таке діелектрична дисперсія ?
2. Які види діелектричної дисперсії Ви знаєте? Дайте їм визначення.
3. Якими параметрами характеризується діелектрична дисперсія?
4. Який характер має частотна залежність коефіцієнту діелектричних втрат в області діелектричної дисперсії?
5. Як визначається ширина діелектричної дисперсії?
6. З яким механізмом поляризації пов'язана резонансна діелектрична дисперсія?
7. Між якими параметрами діелектрика встановлює зв'язок діаграма Коул-Коул?
8. Від чого залежить час релаксації?
9. Яке максимальне значення і на якій частоті приймає коефіцієнт діелектричних втрат в області релаксаційної діелектричної дисперсії?
10. Яке максимальне значення і на якій частоті приймає тангенс кута діелектричних втрат в області релаксаційної діелектричної дисперсії?

Лабораторна робота № 1-3

Вивчення основних механізмів діелектричних втрат

Мета роботи: експериментальне дослідження діелектричних втрат матеріалів за умов різних зовнішніх впливів (наприклад, частоти електричного поля, температур) та визначення основних механізмів діелектричних втрат.

Теоретичний розділ

Зовнішнє електричне поле прикладене до діелектрика виконує роботу по зміщенню (процес поляризації), або переміщенню (процес електропровідності) заряджених частинок діелектрика. Це означає, що в діелектрику відбувається процес поглинання енергії зовнішнього електричного поля. Цей процес є достатньо складним і суттєво залежить як від типу і кількості частинок, що зміщуються (переміщуються) електричним полем, так і від частоти поля, температури діелектрика, особливостей його будови. Але в будь якому випадку він призводить до того , що в діелектрику під дією електричного поля виділяється потужність, яку називають діелектричними втратами.

Для кількісної оцінки та порівняння величини діелектричних втрат в різних діелектричних матеріалах застосовують параметри «тангенс кута діелектричних втрат» $\operatorname{tg}\delta$, та "коефіцієнт діелектричних втрат" (дорівнює добутку відносної діелектричної проникності на тангенс кута діелектричних втрат):

$$\epsilon'' = \epsilon' \cdot \operatorname{tg}\delta \quad (3.1)$$

Кутом діелектричних втрат (δ) називають кут який доповнює кут зсуву фаз (φ) між струмом та напругою на векторній діаграмі ємнісного ланцюжку до 90° (Рис.3-1).

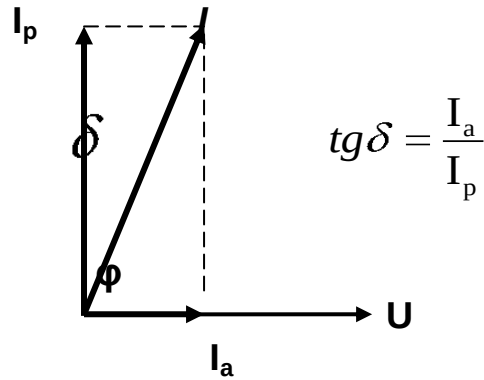


Рис.3-1.

Якщо відштовхуватись від загальновідомого виразу для потужності в електричному колі,

$$P = U I \cos \varphi = U I_a \quad (3.2)$$

то, враховуючи що $I_a = I_p \operatorname{tg} \delta = \frac{U}{\frac{1}{\omega C}} \operatorname{tg} \delta$, отримаємо:

$$P = U^2 \omega C \operatorname{tg} \delta \quad (3.3)$$

де C - ємність діелектрика , а ω – кругова частота .

Запишемо C , як ємність плаского конденсатора $C = \frac{\epsilon_0 \epsilon S}{d}$, тоді

$$P = \frac{U^2 \omega \epsilon \epsilon_0 S \operatorname{tg} \delta}{d} = \frac{U^2 \omega \epsilon_0 S \epsilon''}{d} \quad (3.4)$$

Діелектричні втрати які віднесені до одиниці об'єму діелектрика називають питомими діелектричними втратами $P_{\text{пит}}$, які відповідно до (3.4) можуть бути записані як

$$P_{\text{пит}} = E^2 2\pi f \epsilon_0 \epsilon'' \quad (3.5)$$

Діелектричні втрати можуть бути обумовлені різними механізмами, особливості проявлення яких залежать як від будови речовини, так і від зовнішніх умов (характеристик електричного поля, температури, ...).

Прийнято розрізняти такі основні види діелектричних втрат:

- діелектричні втрати на електропровідність – частина діелектричних втрат обумовлена наскрізним струмом діелектрика;
- релаксаційні діелектричні втрати - частина діелектричних втрат, обумовлена релаксаційною діелектричною дисперсією.
- резонансні діелектричні втрати - частина діелектричних втрат, обумовлена резонансною діелектричною дисперсією.

Діелектричні втрати на електропровідність.

Густина активної складової струму може бути подана у вигляді

$J_a = \gamma E$. Густина реактивної складової $J_p = \frac{U\omega C}{S}$. Тоді, для діелектрика у

вигляді площинного конденсатора ($C = \frac{\epsilon \epsilon_0 S}{d}$), отримаємо $J_p = \epsilon \epsilon_0 \omega E$.

З урахуванням цього:

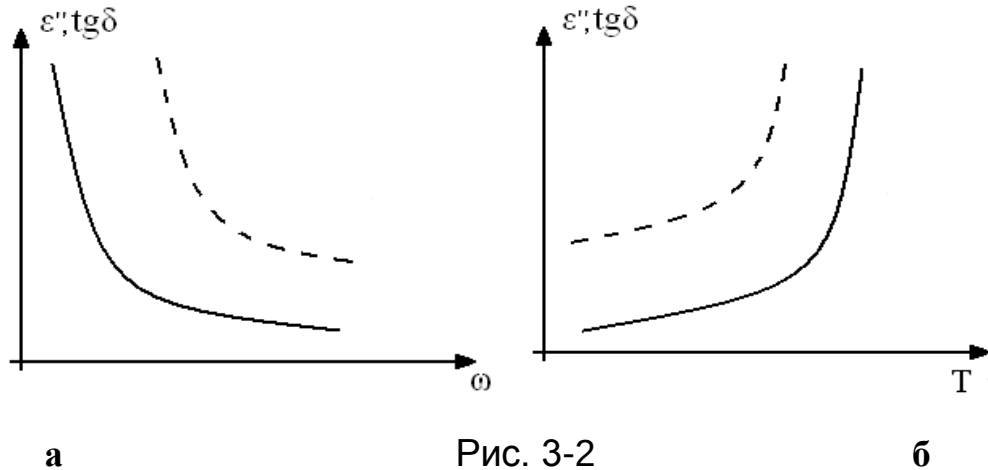
$$\operatorname{tg} \delta = \frac{J_a}{J_p} = \frac{\gamma}{\epsilon \epsilon_0 \omega}; \quad (3.7)$$

$$\epsilon'' = \epsilon \operatorname{tg} \delta = \frac{\gamma}{\epsilon_0 \omega}. \quad (3.8)$$

З отриманих співвідношень випливає, що в діелектричних матеріалах, у яких головним видом діелектричних втрат є втрати на електропровідність, $\operatorname{tg} \delta$ та ϵ'' зменшується при зростанні частоти електричного поля. На рис. 3.2. а та б показані залежності цих параметрів від частоти та температури. Зростання $\operatorname{tg} \delta$ та ϵ'' з температурою пояснюється відповідним зростанням електропровідності.

Для діелектриків у яких єдиним механізмом втрат є втрати на електропровідність вираз (3.7), з урахуванням числових значень ϵ_0 та $\omega = 2\pi f$, використовується у вигляді:

$$\operatorname{tg}\delta = \frac{1,8 \cdot 10^{10}}{\rho \cdot \epsilon' \cdot f}, \text{ де } \rho - \text{питомий опір, [Ом}\cdot\text{м]}. \quad (3.9)$$



Релаксаційні діелектричні втрати.

Релаксаційні діелектричні втрати суттєво залежать як від частоти електричного поля, так і від температури.

Аналіз виразу для $\operatorname{tg}\delta$ з дисперсійної формули Дебая (2.7), а саме

$$\operatorname{tg}\delta = \frac{\epsilon_{\text{ст}} - \epsilon_{\infty} \frac{\omega\tau}{1 + \omega^2\tau^2}}{\epsilon_{\text{ст}} + \epsilon_{\infty} \frac{\omega\tau}{1 + \omega^2\tau^2}}, \text{ показує, що залежність } \operatorname{tg}\delta(\omega) \text{ являє собою криву}$$

$$\text{з максимумом на частоті } \omega_0 = \frac{1}{\tau} \sqrt{\frac{\epsilon_{\text{ст}}}{\epsilon_{\infty}}}$$

Через те, що час релаксації залежить від температури

$$\left(\tau = \frac{1}{2\nu} \exp\left(\frac{U}{KT}\right) \right), \text{ де } \nu - \text{частота теплових коливань "слабко"}$$

зв'язаної частинки, U - висота потенційного бар'єру, K - константа Больцмана), її підвищення призводить до зміщення частотного максимуму в бік більш високих частот, а зниження температури в бік низьких частот (Рис.3-3).

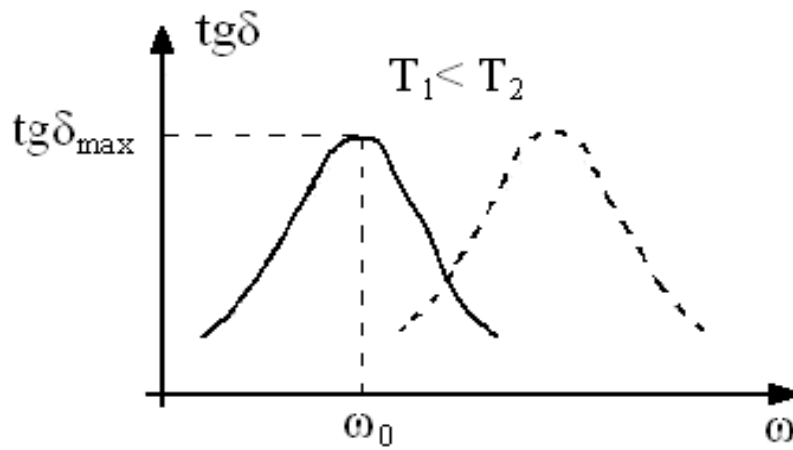


Рис.3-3

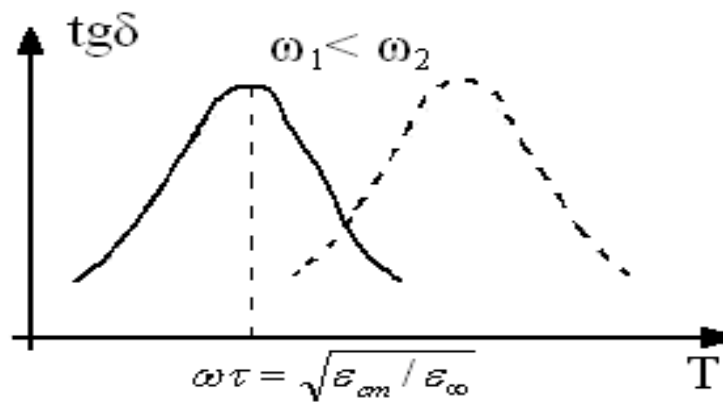


Рис. 3-4.

Залежність релаксаційних діелектричних втрат від температури можна отримати з дисперсійної формули Дебая, якщо ввести до неї температуру в явному вигляді, враховуючи залежність від температури поляризуємості релаксаторів та часу релаксації :

$$\text{tg}\delta = \frac{A\omega \exp \frac{B}{T}}{T(\epsilon_{\text{ст}} + \epsilon_{\infty} \omega^2 \exp \frac{2B}{T})}$$

спрощено $\text{tg}\delta \approx \frac{A}{T} \exp \left(\frac{B}{T} \right)$ (3.10)

для низьких частот або високих температур $\omega\tau < 1$, тобто, коли релаксаційна поляризація встигає встановлюватися.

Для високих частот або низьких температур $\omega\tau > 1$, тобто, коли релаксаційна поляризація не встигає встановлюватися.

$$\operatorname{tg}\delta \approx \frac{A}{T} \exp\left(-\frac{B}{T}\right) \quad (3.11)$$

Відповідно загальна залежність $\operatorname{tg}\delta(T)$ буде мати вигляд, зображений на Рис. 3-4. Залежність має максимум при температурі, яка забезпечує виконання співвідношення

$$\omega\tau = \sqrt{\epsilon_{\text{ст}} / \epsilon_{\infty}}. \quad (3.12)$$

Таким чином положення максимуму залежності $\operatorname{tg}\delta(T)$ буде визначатися частотою, на якій виконується дослідження, а саме – при підвищенні частоти максимум буде зміщуватись у бік більш високих температур і навпаки, зменшення частоти призведе до того, що максимум зміститься в бік більш низьких температур.

Температурні залежності $\operatorname{tg}\delta(T)$ отримані при різних частотах, можуть бути використані для визначення висоти потенційного бар'єру релаксаторів. Для цього необхідно виміряти температури T_1 та T_2 , при яких на частотах ω_1 та ω_2 мають місце максимуми $\operatorname{tg}\delta(T)$. Висота потенціального бар'єра визначається формулою

$$U = \frac{k T_1 T_2}{T_2 - T_1} \ln \frac{\omega_2}{\omega_1}, \quad (3.13)$$

де k - константа Больцмана.

Для діелектричних матеріалів, у яких досить сильно проявляються обидва механізми втрат (втрати на електропровідність та релаксаційні втрати), температурно-частотні залежності мають вигляд, зображений на рис. 3-5.

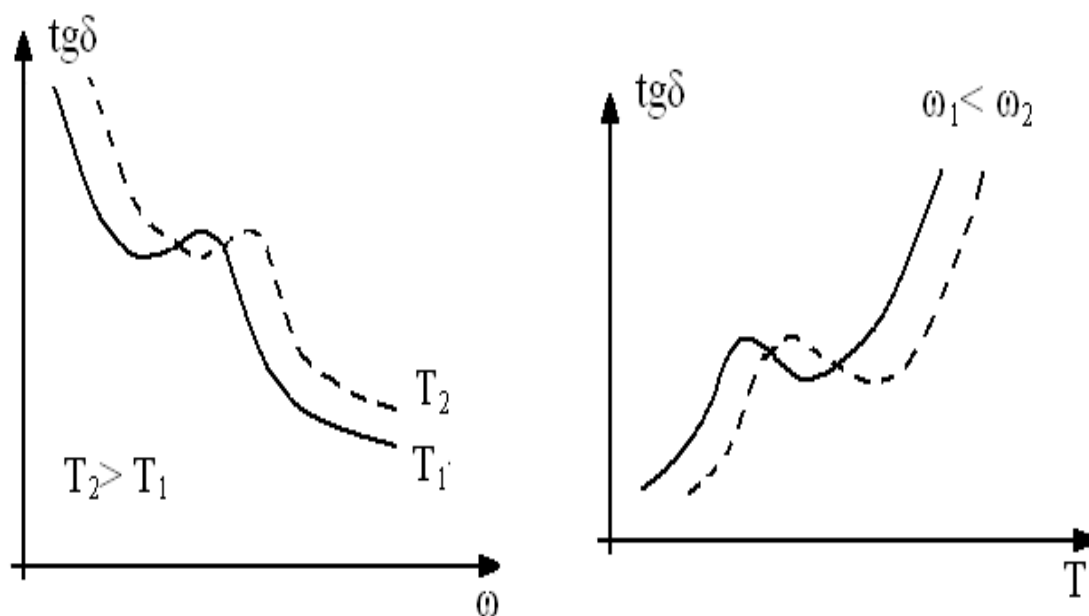


Рис. 3-5.

Експериментальне обладнання та методика дослідження

Вимірювання діелектричних втрат у діапазоні частот (або температур) здійснюється з використанням вимірювальних мостів на фіксованих частотах, вимірювальних мостів разом з вимірювальним генератором у звуковому діапазоні частот, або вимірювачів добротності у широкому діапазоні частот, з використанням термостатів для розміщення експериментальних зразків матеріалів.

Інформація стосовно характеристик та похибок приладів знаходяться в технічній документації до них.

В разі проведення дослідження вимірювачем добротності BM560 слід мати на увазі наступне. Дослідження як правило проводиться на зразках ємністю більше за 425 пФ тому використовується наведена нижче схема підключення зразка до клем вимірювача (рис.3-6):

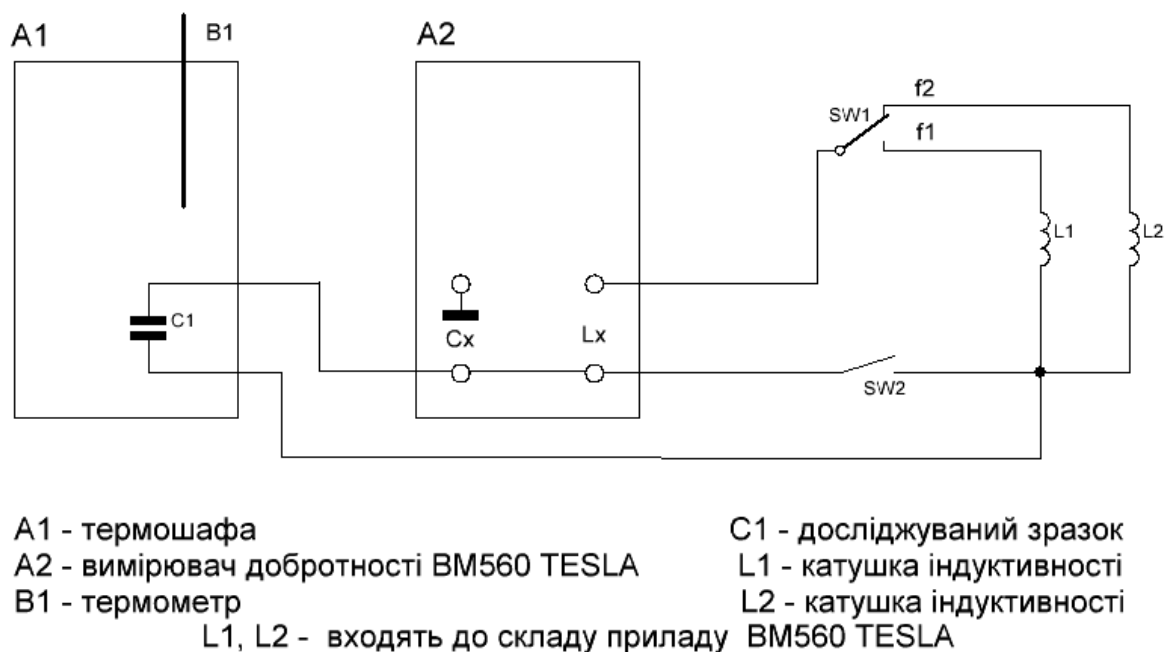


Рис.3-6. Схема вимірювань

При дослідженні залежностей $C(T)$ та $\text{tg}\delta(T)$ матеріалів у заданому температурному діапазоні для двох різних частот за допомогою вимірювача добротності BM-560, слід мати на увазі наступне. Частоти, на яких проводиться вимірювання, як правило, вибираються на різних частотних діапазонах вимірювача добротності BM-560. Це дозволяє достатньо швидко переходити з однією частоти на іншу натиснувши кнопку необхідного діапазону частоти та відповідно змінивши вимірювальну котушку індуктивності. Оскільки результати вимірювання C_1 та Q_1 не залежать від температури їх значення може бути визначено до проведення температурного дослідження. Таким чином при виконанні лабораторної роботи рекомендується наступна послідовність дій (за умови, що ємність зразка C_x більше за 425 pF):

1. Встановіть першу частоту, на якій потрібно проводити вимірювання.
2. З комплекту котушок індуктивності підберіть таку, яка забезпечує

проведення вимірювання на встановленій частоті і підключіть її до клем L_x .

3. Налаштуйте вимірювальний контур в резонанс і зафіксуйте отримані величини Q_1 і C_1 при першій частоті.

4. Встановіть другу частоту, на якій потрібно проводити вимірювання.

5. З комплекту котушок індуктивності підберіть таку, яка забезпечує проведення вимірювання на встановленій частоті і підключіть її до клем L_x .

6. Налаштуйте вимірювальний контур в резонанс і зафіксуйте отримані величини Q_1 і C_1 при другій частоті.

7. Підключіть термошафу до джерела живлення.

8. До клем L_x підключіть досліджуваний зразок послідовно з відповідною котушкою індуктивності, налаштуйтеся в резонанс на першій частоті і визначте значення Q_2 і C_2 при заданій температурі.

9. Встановіть другу частоту вимірювання (переключивши вимірювач ВМ-560 на необхідний діапазон частот та вибравши відповідну котушку індуктивності).

10. Проведіть вимірювання відповідно до п.8 на другій частоті.

Розрахунок C_x , Q_x та $\text{tg } \delta$ для кожного значення температури провадиться за наступними формулами:

$$C_x = \frac{C_1 C_2}{C_2 - C_1}; \quad Q_x = \frac{|C_1 - C_2| Q_1 \cdot Q_2}{C_1 Q_1 - C_2 Q_2}; \quad \text{tg } \delta = \frac{1}{Q_x}$$

Результати вимірювання та розрахунків повинні бути зведені до єдиної Таблиці (можливий варіант такої Таблиці наведено у додатковій інформації до Лабораторної роботи).

У випадку необхідності дослідження зразків з ємністю менше 425 пФ слід додатково скористатися методикою дослідження наведеною у Лабораторній роботі 1-2.

Завдання

1. Ознайомитися з устаткуванням та методикою експериментального дослідження.
2. Ознайомитися з дослідними зразками.
3. Дослідити залежність $C(T)$ та $\operatorname{tg}\delta(T)$ матеріалів у заданому температурному діапазоні для двох різних частот.
4. Скласти таблицю, які містять у собі всі експериментально виміряні та обчислені величини.
5. Побудувати на одному графіку залежності $C_x = \varphi(T)$ для двох різних частот.
6. Побудувати на одному графіку залежності $\operatorname{tg}\delta = \varphi(T)$ для двох різних частот.
6. Визначити механізми діелектричних втрат у матеріалах.
9. Зробити висновки до роботи.

Література

- [1] с. 200-211.
- [2] с. 213-235.
- [4] с. 116-125
- [5] с. 45- 51.
- [8]

Додаткова інформація

а) Приклад Таблиці для занесення експериментальних та розрахункових даних.

$t^{\circ}\text{C}$	$f_1= \quad C_1= \quad Q_1=$					$f_2= \quad C_1= \quad Q_1=$				
	C_2, pF	Q_2	C_x, pF	Q_x	$\text{tg}\delta$	C_2, pF	Q_2	C_x, pF	Q_x	$\text{tg}\delta$
20										
25										
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...

б) Питання для самоконтролю студентів

1. Що таке діелектричні втрати ?
2. Які види діелектричних втрат Ви знаєте?
3. Якими параметрами характеризуються діелектричні втрати?
4. Як пов'язані між собою відносна діелектрична проникність, коефіцієнт діелектричних втрат та тангенс кута діелектричних втрат?
5. Який характер має частотна залежність тангенса кута діелектричних втрат при втратах на електропровідність?
6. Який характер має температурна залежність тангенса кута діелектричних втрат при втратах на електропровідність?
7. Який характер має частотна залежність тангенса кута діелектричних втрат в області релаксаційної діелектричної дисперсії?
8. Який характер має температурна залежність тангенса кута діелектричних втрат в області релаксаційної діелектричної дисперсії?
9. Від чого залежить положення температурних максимумів релаксаційних діелектричних втрат?
10. Як можна розрахувати потужність діелектричних втрат?

Лабораторна робота № 1-4

Визначення ефективних параметрів неоднорідних діелектриків

Мета роботи: Дослідження температурних залежностей ε та $\operatorname{tg}\delta$ неоднорідних діелектриків, експериментальна перевірка розрахункових формул для визначення ефективних параметрів неоднорідних діелектриків.

Теоретичний розділ

До неоднорідних діелектриків відносять діелектричні матеріали які являють собою композиції, що складаються з деякого числа компонент, які мають різні значення діелектричних параметрів (наприклад, ε , $\operatorname{tg}\delta$, ρ).

Неоднорідними діелектриками як правило є більшість технічних діелектриків. Основними параметрами таких діелектриків є так звані «ефективні» значення відносної діелектричної проникності та тангенсу кута діелектричних втрат (ε_{ef} , $\operatorname{tg}\delta_{\text{ef}}$).

Для більшості неоднорідних діелектриків характерна наявність міграційної поляризації, яка зумовлена в основному переміщенням та накопиченням зарядів на межі розподілу компонент, що складають неоднорідний діелектрик. Різноманітність видів «неоднорідностей», які містяться в технічних твердих діелектриках, не дозволяє розглянути особливості міграційної поляризації з мікроскопічної точки зору. Тому для оцінки впливу цього виду поляризації на параметри неоднорідних діелектриків і перш за все на частотні залежності ε та $\operatorname{tg}\delta$ використовують аналіз еквівалентної схеми заміщення неоднорідного діелектрика. Найпростішим варіантом такої еквівалентної схеми

заміщення є схема представлена на Рис. 4-1 де C_{∞} характеризує ємність, яка виникає за рахунок швидких видів поляризації C_a - ємність, що зумовлена міграційною поляризацією, r_a характеризує втрати при міграційній поляризації а R - втрати на електропровідність.

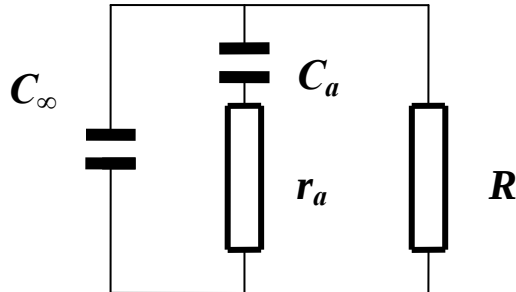


Рис. 4-1

Запишемо загальний вираз для провідності такої еквівалентної схеми:

$$Y^* = Y_{\infty} + Y_a + 1/R \quad (4.1)$$

де $Y_{\infty} = j\omega C_{\infty}$, $Y_a = 1/Z_a = \frac{1}{r_a + \frac{1}{j\omega C_a}}$, тобто

$$Y^* = j\omega C_{\infty} + \frac{j\omega C_a}{r_a j\omega C_a + 1} + \frac{1}{R}, \text{ або позначивши } r_a C_a = \tau \text{ отримаємо}$$

$$Y^* = j\omega C_{\infty} + \frac{j\omega C_a}{j\omega \tau + 1} + \frac{1}{R} \quad (4.2)$$

Розділивши окремо дійсну та уявну частину запишемо останній вираз у вигляді

$$Y^* = j\omega \left(C_{\infty} + \frac{C_a}{1 + \omega^2 \tau^2} \right) + \frac{\omega^2 C_a \tau}{1 + \omega^2 \tau^2} + \frac{1}{R} \quad (4.3)$$

Якщо ж неоднорідний діелектрик розглянути як плаский конденсатор с комплексною діелектричною проникністю $\epsilon^* = \epsilon' - j\epsilon''$ то можна записати його провідність як

$$Y^* = j\omega(\epsilon' - j\epsilon'')C_0 = j\omega\epsilon' C_0 + \epsilon'' \omega C_0 \quad (4.4)$$

де C_0 «геометрична ємність» = $\epsilon_0 S/d$.

Порівнявши вирази (4.3) та (4.4) отримаємо:

$$\epsilon' = \frac{C_\infty}{C_0} + \frac{\frac{C_a}{C_0}}{1 + \omega^2 \tau^2}, \quad \epsilon'' = \frac{\frac{C_a}{C_0} \omega \tau}{1 + \omega^2 \tau^2} + \frac{1}{R \omega C_0}. \quad (4.5)$$

Позначивши $\epsilon'_{\omega \rightarrow \infty}$ як $\epsilon_\infty = \frac{C_\infty}{C_0}$, а $\epsilon'_{\omega \rightarrow 0}$ як $\epsilon_{ст.} = \frac{C_\infty + C_a}{C_0}$,
отримаємо:

$$\epsilon' = \epsilon_\infty + \frac{\epsilon_{ст.} - \epsilon_\infty}{1 + \omega^2 \tau^2}; \quad \epsilon'' = \frac{(\epsilon_{ст.} - \epsilon_\infty) \omega \tau}{1 + \omega^2 \tau^2} + \frac{1}{R \omega C_0} \quad (4.6)$$

або з урахуванням виразу для C_0 , та $R = \frac{\rho d}{S}$

$$\epsilon'' = \frac{(\epsilon_{ст.} - \epsilon_\infty) \omega \tau}{1 + \omega^2 \tau^2} + \frac{\sigma}{\epsilon_0 \omega} \quad (4.7)$$

де σ – питома електропровідність діелектрика.

Характер частотних залежностей ϵ' та ϵ'' при міграційній поляризації та втратах на електропровідність, відповідно до отриманих виразів, представлено на Рис.4-2.

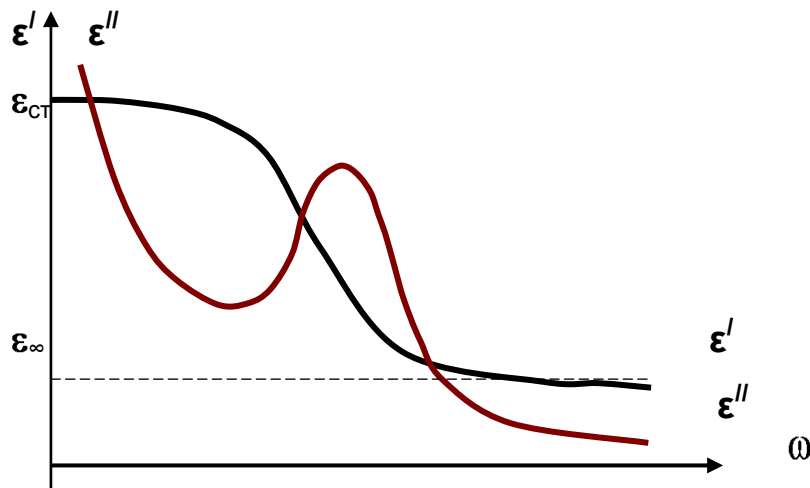


Рис. 4-2.

При розробці та виготовленні технічних діелектриків, які в більшості випадків є неоднорідними, практичне значення набуває питання визначення ефективних значень відносної діелектричної проникності та діелектричних втрат ($\epsilon_{\text{еф}}$ та $\text{tg}\delta_{\text{еф}}$), які будуть мати ці матеріали в залежності від параметрів та концентрації компонент які їх утворюють.

Для прикладу розглянемо декілька найбільш простих ситуацій які мають місце для шаруватих діелектриках.

При паралельному поєднанні шарів двох різних діелектриків (див. Рис. 4-3а) їх сумарна ємність ($C_{\text{еф}}$), як відомо, дорівнюватиме сумі ємностей обох шарів і може бути представлена через деяку ефективну діелектричну проникність та геометричні розміри шарів (для спрощення математичних виразів будемо вважати, що товщина шарів однакова).

$$C_{\text{еф}} = C_1 + C_2 = \frac{\epsilon_1 \epsilon_0 S_1}{d} + \frac{\epsilon_2 \epsilon_0 S_2}{d} = \frac{\epsilon_{\text{еф}} \epsilon_0 (S_1 + S_2)}{d} \text{ звідки отримаємо:}$$

$$\epsilon_{\text{еф}} = \frac{\epsilon_1 S_1 + \epsilon_2 S_2}{S_1 + S_2}, \text{ або через відносні об'ємні концентрації компонент}$$

X_1 та X_2 , де відповідно $X_1 = \frac{W_1}{W_{\Sigma}}$, $X_2 = \frac{W_2}{W_{\Sigma}}$ (відношення об'єму компонент W_1 , W_2 до загального об'єму W_{Σ}).

$$\epsilon_{\text{еф}} = \epsilon_1 X_1 + \epsilon_2 X_2 \quad (4.8)$$

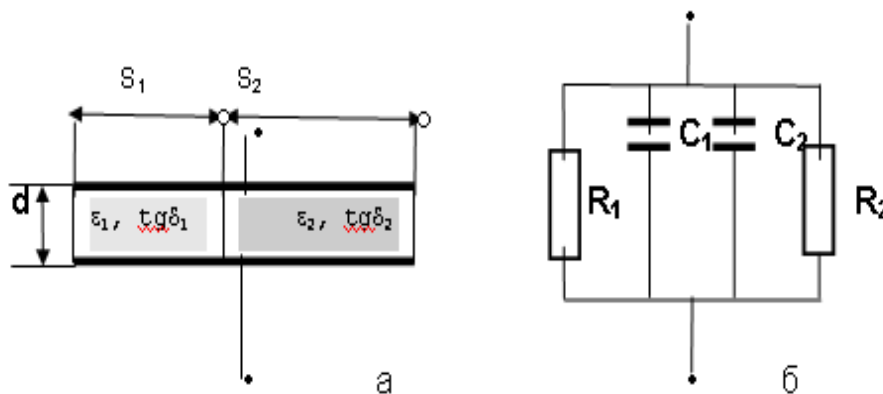


Рис. 4-3

Для визначення $\text{tg}\delta_{\text{еф}}$ використовують еквівалентну схему наведену на рис. 4-3 б. Відповідно до неї:

$$\text{tg}\delta_{\text{еф}} = \frac{I_{\text{ак}}}{I_{\text{реакт}}} = \frac{\frac{U}{R_1} + \frac{U}{R_2}}{U\omega C_1 + U\omega C_2},$$
 або враховуючи, що при паралельній схемі заміщення $\text{tg}\delta = 1/R\omega C$, отримаємо:

$$\text{tg}\delta_{\text{еф}} = \frac{C_1 \text{tg}\delta_1 + C_2 \text{tg}\delta_2}{C_1 + C_2}$$
 і відповідно через об'ємні концентрації компонент

$$\text{tg}\delta_{\text{еф}} = \frac{\epsilon_1}{\epsilon_{\text{еф}}} x_1 \text{tg}\delta_1 + \frac{\epsilon_2}{\epsilon_{\text{еф}}} x_2 \text{tg}\delta_2. \quad (4.9)$$

При послідовному поєднанні шарів двох різних діелектриків (див. Рис. 4-4а) їх сумарна ємність ($C_{\text{еф}}$), як відомо, може бути представлена у

$$\text{вигляді } \frac{1}{C_{\text{еф}}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}, \text{ тобто } C_{\text{еф}} = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} = \frac{\epsilon_{\text{еф}} \epsilon_0 S}{d_1 + d_2} \quad (4.10)$$

(для спрощення математичних виразів будемо вважати, що площа шарів однакова і відповідно $C_1 = \frac{\epsilon_1 \epsilon_0 S}{d_1}$; $C_2 = \frac{\epsilon_2 \epsilon_0 S}{d_2}$).

Тоді, підставивши C_1 та C_2 в (4.10) і використовуючи поняття відносної об'ємної концентрації компонент (x_1 та x_2) можна отримати:

$$\epsilon_{\text{еф}} = \frac{\epsilon_1 \epsilon_2}{x_1 \epsilon_2 + x_2 \epsilon_1}. \quad (4.11)$$

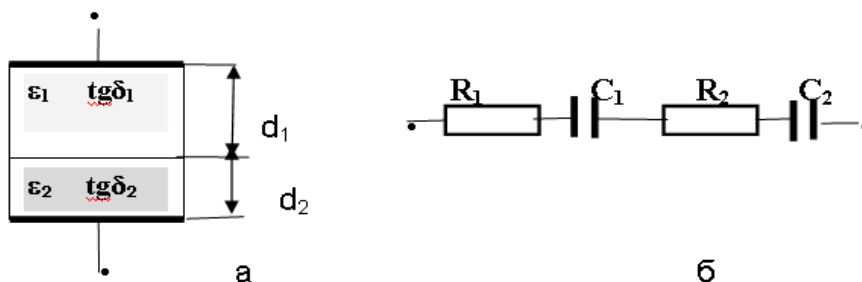


Рис. 4-4

Для розрахунку $\text{tg}\delta_{\text{еф}}$ використовують еквівалентну схему заміщення представлену на Рис. 4-4б. У випадку якщо $\text{tg}\delta_1 \ll 1$ і $\text{tg}\delta_2 \ll 1$ отримаємо:

$$\text{tg}\delta_{\text{еф}} = \frac{\text{tg}\delta_2 C_1 + \text{tg}\delta_1 C_2}{C_1 + C_2}, \text{ або через об'ємні концентрації,}$$

$$\text{tg}\delta_{\text{еф}} = \frac{x_2 \text{tg}\delta_2 \epsilon_1 + x_1 \text{tg}\delta_1 \epsilon_2}{\epsilon_1 x_2 + \epsilon_2 x_1} \quad (4.12)$$

Ефективна діелектрична проникність шаруватих діелектриків при більшій кількості складових компонент може бути представлена наступним виразом:

$$\epsilon_{\text{еф}}^{\beta} = \sum_{i=1}^n x_i \epsilon_i^{\beta} \quad (4.13)$$

де $\beta = 1$ при паралельному з'єднанні шарів та $\beta = -1$ при послідовному.

Для визначення $\epsilon_{\text{еф}}$ та $\text{tg}\delta_{\text{еф}}$ двокомпонентної суміші з хаотичним розташуванням компонент використовують логарифмічну формулу Ліхтенекера:

$$\lg \epsilon_{\text{еф}} = x_1 \lg \epsilon_1 + x_2 \lg \epsilon_2 \quad (4.14)$$

$$\lg(\text{tg}\delta_{\text{еф}}) = x_1 \lg(\text{tg}\delta_1) + x_2 \lg(\text{tg}\delta_2)$$

Якщо неоднорідний діелектрик являє собою матричну суміш в якій відносна діелектрична проникність матричної основи становить $\epsilon_{\text{осн}}$, а домішку введеного в неї $\epsilon_{\text{дом}}$, то при об'ємній концентрації домішки (x), $\epsilon_{\text{еф}}$ можна визначити за допомогою формули Максвела – Вагнера:

$$\epsilon_{\text{еф}} = \epsilon_{\text{осн}} \frac{2\epsilon_{\text{осн}} + \epsilon_{\text{дом}} + 2x(\epsilon_{\text{осн}} - \epsilon_{\text{дом}})}{2\epsilon_{\text{осн}} + \epsilon_{\text{дом}} - x(\epsilon_{\text{осн}} - \epsilon_{\text{дом}})} \quad (4.15)$$

Експериментальне обладнання та методика дослідження

Основною апаратурою для проведення дослідження в заданому діапазоні частот є вимірювальні мости та резонансні вимірювачі добротності. Вся інформація, необхідна для правильного використання вимірювальної апаратури, знаходиться в технічній документації до обладнання, яка повинна використовуватись при проведенні роботи. Загальна схема вимірювання представлена на рис.4-5.

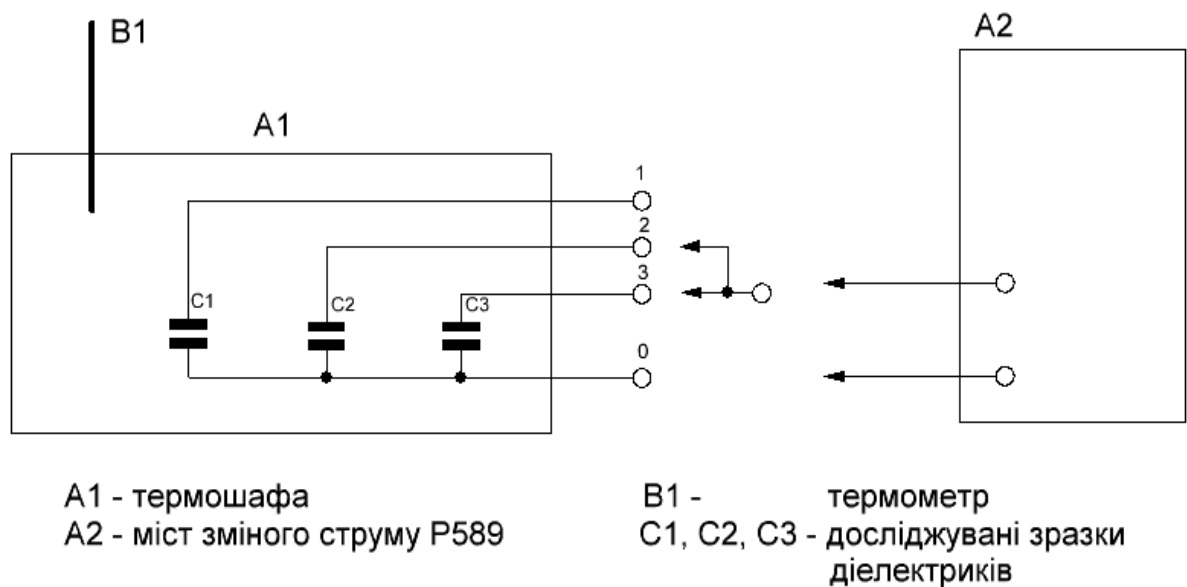


Рис.4-5. Схема вимірювань

При проведенні дослідження в даній лабораторній роботі рекомендується така послідовність дій:

- провести вимірювання температурної залежності ємності і $\text{tg}\delta$ зразків 1; 2; 3 (C_1 ; C_2 ; C_3 ; $\text{tg}\delta_1$; $\text{tg}\delta_2$; $\text{tg}\delta_3$) та ємності і $\text{tg}\delta$ для послідовного з'єднання зразків 1 і 2 (зразки з однаковою площею, C_{12} ; $\text{tg}\delta_{12}$), а також ємності і $\text{tg}\delta$ для паралельного з'єднання зразків 2 і 3 (зразки з однаковою товщиною, C_{23} ; $\text{tg}\delta_{23}$);

- розрахувати відповідно до геометричних розмірів зразків відносну діелектричну проникність ϵ_1 ; ϵ_2 ; ϵ_3 ; ϵ_{12} ; ϵ_{23} . ($\epsilon = \frac{C \cdot d}{\epsilon_0 \cdot S}$, розміри товщини d_1 , d_2 , d_3 та площини S_1 , S_2 , S_3 досліджуваних зразків отримати у викладача на лабораторній роботі);
- використовуючи формули для $\epsilon_{\text{еф}}$ та $\text{tg}\delta_{\text{еф}}$ (при послідовному - 4.11; 4.12, а при паралельному з'єднанні - 4.8; 4.9) відповідно до об'ємних концентрацій розрахувати температурні залежності $\epsilon_{12}^{\text{p03}}$; $\epsilon_{23}^{\text{p03}}$; $\text{tg}\delta_{12}^{\text{p03}}$; $\text{tg}\delta_{12}^{\text{p03}}$. (Форми рекомендованих таблиць для занесення експериментальних та розрахункових даних наведені нижче в Додатковій інформації до Лабораторної роботи).

Завдання

1. Ознайомитися з устаткуванням та методикою експериментального дослідження.
2. Ознайомитися з дослідними зразками.
3. Заміряти значення C_1 ; C_2 ; C_3 ; $\text{tg}\delta_1$; $\text{tg}\delta_2$; $\text{tg}\delta_3$; C_{12} ; $\text{tg}\delta_{12}$; C_{23} ; $\text{tg}\delta_{23}$ при температурах вказаних викладачем.
4. Розрахувати ϵ зразків №1, №2, №3 при вказаних температурах.
5. Розрахувати $\epsilon_{\text{еф}}$ при послідовному включенні зразків №1 та №2 (ϵ_{12}) при тих же температурах.
6. Розрахувати $\epsilon_{\text{еф}}$ при паралельному включенні зразків №2 та №3 (ϵ_{23}) при тих же температурах.
7. Виходячи з даних отриманих у п.3-4 та об'ємної концентрації компонент розрахувати значення $\epsilon_{12}^{\text{p03}}$ і $\text{tg}\delta_{12}^{\text{p03}}$ для випадку

послідовного включення зразків 1;2 (формули 4.11; 4.12).

8. Виходячи з даних отриманих у п.3-4 та об'ємної концентрації

компонент розрахувати значення ϵ_{23}^{p03} і $tg\delta_{23}^{p03}$ для випадку паралельного включення зразків 2; 3 (формули 4.8; 4.9).

9. Побудувати на одному графіку температурні залежності ϵ_{12} та

ϵ_{12}^{p03} , а на другому температурні залежності $tg\delta_{12}$ та $tg\delta_{12}^{p03}$.

10. Побудувати на одному графіку температурні залежності ϵ_{23}

та ϵ_{23}^{p03} , а на другому температурні залежності $tg\delta_{23}$ та

$tg\delta_{23}^{p03}$.

11.Зробити висновки по роботі стосовно характеру

температурних залежностей та відповідності

експериментальних та теоретичних результатів визначення

ϵ_{ef} та $tg\delta_{ef}$ шаруватих діелектриків.

Література

[2] с. 243-248.

[3] с. 281-295;

[5] с. 94 - 98;

[8].

Додаткова інформація

а) Приклад Таблиць для занесення експериментальних та розрахункових даних.

t^0 C	C_1	ϵ_1	$\text{tg}\delta_1$	C_2	ϵ_2	$\text{tg}\delta_2$	C_3	ϵ_3	$\text{tg}\delta_3$	C_{12}	ϵ_{12}	$\text{tg}\delta_{12}$	C_{23}	ϵ_{23}	$\text{tg}\delta_{23}$
20															
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...

t^0 C	$\epsilon_{12}^{\text{poz}}$	$\epsilon_{23}^{\text{poz}}$	$\text{tg}\delta_{12}^{\text{poz}}$	$\text{tg}\delta_{23}^{\text{poz}}$
20				
...	...	...	...	...
...	...	...	...	...

б) Питання для самоконтролю студентів:

1. Які матеріали належать до неоднорідних діелектриків?
2. Що таке міграційна поляризація?
3. Який характер має частотна залежність відносної діелектричної проникності при міграційній поляризації?
4. Який характер має частотна залежність коефіцієнта діелектричних втрат при міграційній поляризації?
5. Як розраховується об'ємна концентрація компонент неоднорідних діелектриків?
6. Основні технічні параметри неоднорідних діелектриків.
7. Яка відносна діелектрична проникність буде у хаотичній суміші двох компонент однакової об'ємної концентрації якщо $\epsilon_1=10$, а $\epsilon_2=1000$?

Лабораторна робота №1-5

Визначення основних характеристик та параметрів п'єзокерамічних діелектриків

Мета роботи: дослідження п'єзокерамічних матеріалів методом резонансу-антирезонансу; визначення основних електромеханічних параметрів п'єзокерамічних матеріалів.

Теоретичний розділ

П'єзоелектричний ефект полягає у тому, що під дією механічної напруги в певному класі діелектриків виникає поляризація (прямий п'єзоефект) або під дією електричного поля виникає деформація, величина якої лінійно залежить від напруженості цього поля (зворотний п'єзоефект).

Зв'язок між електричними та механічними величинами, який характеризує п'єзоелектричні властивості діелектриків, може бути представлений у вигляді рівнянь п'єзоефекту.

Вибір незалежних змінних визначається умовами проведення експерименту. Якщо знехтувати магнітними властивостями діелектриків і вважати, що теплообмін п'єзоелектрика з оточуючим середовищем мізерний, то можна записати (скорочено, для незалежних **T**-механічна напруга, та **E**-напруженість електричного поля) :

$$\mathbf{D} = \mathbf{d}\mathbf{T} + \boldsymbol{\varepsilon}^T \mathbf{E} \quad (\text{прямий п'єзоефект})$$

$$\mathbf{S} = \mathbf{s}^E \mathbf{T} + \mathbf{d}\mathbf{E} \quad (\text{зворотний п'єзоефект}) \quad (5.1)$$

$\mathbf{s}$ – пружна податливість; $\boldsymbol{\varepsilon}$ – діелектрична проникність;

$\mathbf{D}$ – електрична індукція; $\mathbf{S}$ – деформація.

Якщо вибрати іншу пару незалежних змінних (**T** та **D** , або **E** та **S** , або **S** та **D**), то отримаємо ще три системи рівнянь:

$$\begin{cases} S = gD + s^D T; \\ E = -gT + \beta^T D; \end{cases} \quad \begin{cases} T = -eE + c^E S; \\ D = eS + \epsilon^S E; \end{cases} \quad \begin{cases} T = -hD + c^D S; \\ E = -hS + \beta^S D; \end{cases} \quad (5.2)$$

d g e h – п'єзоелектричні коефіцієнти; β в дорівнює $\frac{1}{\epsilon}$; c дорівнює $\frac{1}{s}$. Індекс S означає механічно затиснутий, а індекс T механічно вільний діелектрик. Індекс E означає електрично замкнений, а індекс D електрично розімкнений діелектрик.

Всі п'єзоелектричні коефіцієнти зв'язані між собою співвідношеннями, які можуть бути легко отримані із рівнянь (5.1), (5.2):

$$\begin{aligned} d &= g\epsilon^T = eS^E; & g &= hs^D = d\beta^T; \\ e &= dc^E = h\epsilon^S; & h &= e\beta^S = gc^D. \end{aligned} \quad (5.3)$$

Для того щоб охарактеризувати п'єзоелектрик, як електромеханічний перетворювач енергії, використовують параметр, який має назву коефіцієнт електромеханічного зв'язку – K . Він може бути визначений через діелектричні, або механічні параметри п'єзо матеріалу,-

$$K^2 = \frac{\epsilon^T - \epsilon^S}{\epsilon^T} = \frac{s^E - s^D}{s^E}. \quad (5.4)$$

або через них, та відповідний п'єзомодуль

$$K^2 = \frac{d^2}{s^E \epsilon^T} \quad (5.5)$$

До основних параметрів, які характеризують п'єзоелектрик відносять коефіцієнт електромеханічного зв'язку (K), п'єзомодуль (у більшості випадків використовують п'єзомодуль d), добротність матеріалу (Q_M) та швидкість звуку у матеріалі ($V_{зв}$)

Експериментальне обладнання та методика дослідження

В даній Лабораторній роботі основні параметри п'єзокерамічних матеріалів визначаються за результатами експериментальних досліджень п'єзоелектричних резонаторів методом резонансу-антирезонансу. П'єзоелектричний резонатор зазвичай представляє собою тіло правильної геометричної форми (у даному випадку,- диск) з двома електродами на відповідних поверхнях.

Залежність активного опору такого резонатору від частоти поблизу першої моди радіальних коливань має вигляд спрощено наведений на Рис.5-1. Мінімальному активному опору відповідає так звана резонансна частота (f_p), а максимальному,- антирезонансна (f_a). Знаючи ці частоти можна розрахувати основні параметри п'єзоелектричного матеріалу з якого виготовлено п'єзорезонатор (див. ф-ли 5.6 - 5.9)

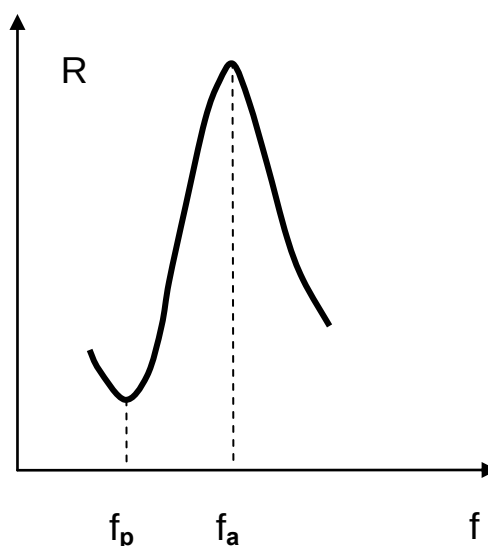
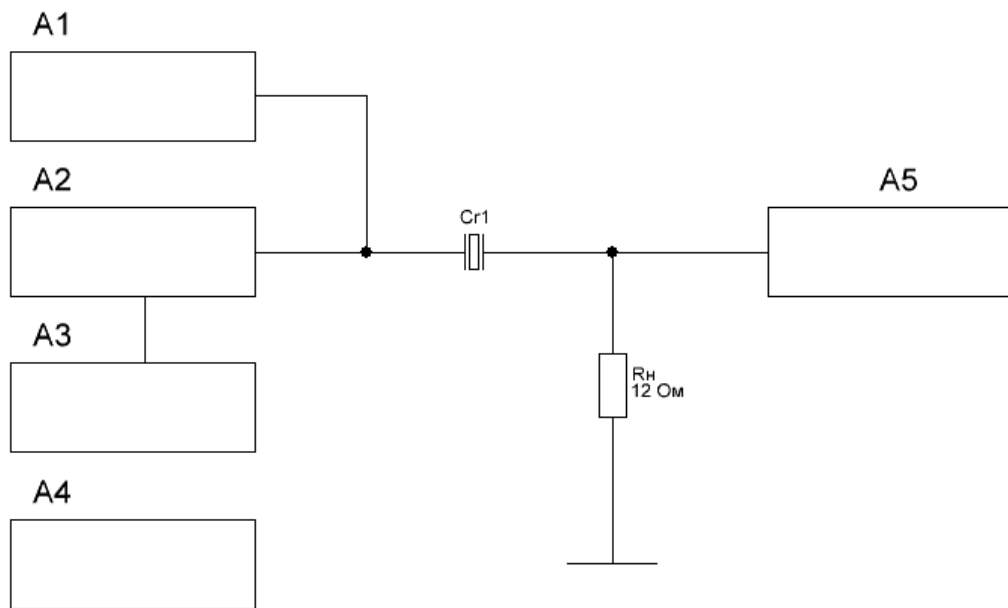


Рис.5-1

Для визначання частот резонансу та антирезонансу використовується вимірвальна схема, показана на рис. 5-2.



A1, A5 мілівольтметр В3-38Б
 A2 - генератор сигналів Г3-33
 Cr1-досліджуваний зразок

A3 - електроний частотомір Ч3-32
 A4 - міст змінного струму Р5010
 Rн-опір навантаження

Рис.5-2. Схема вимірювань

Підтримуючи величину вхідного сигналу постійною (наприклад 0.5 В) змінюють його частоту. При цьому, на частоті резонансу, коли активний опір п'єзо резонатору стає мінімальним, струм у ланцюжку п'єзо резонатор – R_n стає максимальним і відповідно максимальним буде падіння напруги на R_n , що і фіксується вольтметром. Вочевидь, що на частоті антирезонансу падіння напруги на R_n буде мінімальним. Таким чином визначають f_p та f_a .

Основні розрахункові формули:

Коефіцієнт електромеханічного зв'язку:

$$K_p = \sqrt{\left(\frac{\eta^2 - 1}{2(1 + \sigma)}\right) \left(1 - \frac{f_p^2}{f_a^2}\right)}. \quad (5.6)$$

η – найменший додатний корінь частотного рівняння;

σ – коефіцієнт Пуасона;

f_p – резонансна частота [Гц];

f_a – антирезонансна частота [Гц].

Значення η , σ необхідно отримати у викладача на лабораторній роботі.

П'єзомодуль:

$$d_{31} = \frac{0.19 \cdot 10^{-5} K_p}{f_p} \cdot \frac{2}{D} \cdot \sqrt{\frac{\epsilon_{33}^T}{\epsilon_0} \cdot \frac{1}{\rho}} \quad [\text{Кл/Н}] \quad (5.7)$$

D – діаметр резонатора [см];

ρ – об'ємна маса [г/см³];

f_p – частота резонансу [Гц];

$\frac{\epsilon_{33}^T}{\epsilon_0} = \epsilon$ – відносна діелектрична проникність, яка розраховується за

формулою : $\epsilon = \frac{C \cdot d}{\epsilon_0 \cdot S}$, де d – товщина зразка [м], S – площа електродів зразка [м²], C – електрична ємність зразка [Ф] виміряна на частоті 1 кГц. мостом змінного струму, наприклад Р5010. Значення d , S , ρ необхідно отримати у викладача на лабораторній роботі.

Механічна добротність:

$$Q_M = \frac{f_a^2 \cdot 10^{12} K_p}{2\pi R_p C f_p \sqrt{f_a^2 - f_p^2}} \quad (5.8)$$

$R_p = R_n \left(\frac{U_{\text{вх}}}{U_{\text{вих}}} - 1 \right)$ – опір резонатора на резонансній частоті [Ом];

R_n – навантаження [Ом];

C – ємність резонатора на частоті 1000 Гц [пФ].

Швидкість звуку

$$V_{\text{зв}} = \frac{f_p \cdot \pi \cdot D}{\eta} \sqrt{1 - \sigma}, \quad [\text{м/с}] \quad (5.9)$$

D – діаметр резонатора [м],

f_p – частота резонансу [Гц].

Завдання

1. Ознайомитися з устаткуванням, методикою експериментального дослідження та зібрати схему вимірювань рис.5-2.
2. Ознайомитися з дослідними зразками.
3. Дослідити залежність напруги на R_H від частоти електричного сигналу поблизу f_p та f_a .
4. Побудувати залежність $U(f)$ для всіх досліджених резонаторів.
5. Визначити f_p та f_a .
5. Обчислити параметри п'єзо резонаторів: K_p , d_{31} , Q_M , V_{3B} .
(Перед розрахунком d_{31} та Q_M виміряти ємність C досліджуваних зразків мостом змінного струму, наприклад, Р5010).
6. Порівняти отримані значення параметрів з довідковими.
7. Зробити висновки по роботі.

Література

- [1] с. 273-278;
- [3] с. 311 – 336;
- [4] с. 201 – 214;
- [6] с. 4 - 28 ;
- [7] с. 579 – 581, 587 – 591.
- [9]

Додаткова інформація

а) Основні марки та параметри п'єзокерамічних матеріалів:

Марка	Основні хімічні компоненти	Функціональні групи	Рекомендована робоча температура, К (t °C)	
		Призначення	Міні-мальна	Макси-мальна
ТВ-1	Титанат барію	Виготовлення високочутливих п'єзокерамічних елементів, працюючих в режимі прийому та (або) випромінювання.	213 (-60)	333 (60)
ЦТС-19	Цирконат - титанат свинцю			473 (200)
ЦТСНВ-1	Цирконат - титанат свинцю, натрію, вісмуту			393 (120)
ТВК-3	Титанат барію - кальцію	Виготовлення високочутливих п'єзокерамічних елементів, працюючих в режимі прийому та (або) випромінювання в умовах впливу сильних електричних полів та (або) механічних напруг.	213 (-60)	333 (60)
ЦТС-23	Цирконат - титанат свинцю			423 (150)
ЦТС-24	Цирконат - титанат свинцю			423 (150)
НБС-1	Ніобіт барію - свинцю			423 (150)
ЦТВС-3	Цирконат - титанат барію - свинцю			358 (85)
ЦТССт-1	Цирконат - титанат свинцю - стронцію			358 (85)
ТВКС	Титанат барію - кальцію - свинцю	Виготовлення п'єзокерамічних елементів з підвищеною стабільністю частотних характеристик в заданому діапазоні температур та в часі для частотно - селективних пристроїв на об'ємних хвилях.	213 (-60)	358 (85)
ЦТС-22	Цирконат - титанат свинцю			473 (200)
ЦТС-35	Цирконат - титанат свинцю			358 (85)
НБС-3	Ніобіт барію - свинцю			423 (150)
ЦТС-21	Цирконат - титанат свинцю	Виготовлення п'єзокерамічних елементів, що працюють при температурах вище 523 К (250 °C) та мають підвищену стабільність п'єзоелектричних характеристик в заданому діапазоні температур та (або) механічних напруг.	213 (-60)	573 (300)

Марка матеріалу	Відносна діелектрична проникність $\epsilon^T_{33}/\epsilon_0$	Температура точки Кюрі T_K (°C), не менше	Коефіцієнт електро механічного зв'язку K_p , не менше	П'єзoeлектричні модулі $d_{ik} \cdot 10^{12}$, Кл/Н, не менше		Швидкість звуку $v \cdot 10^{-3}$, м/с	Механічна добротність Q_m , не менше	Щільність $\rho \cdot 10^{-3}$, кг/м ³ не менше
				d_{31}	d_{33}			
ТВ-1	1500±300	383 (110)	0,20	45,0	100,0	4,30 – 4,90	100	5,30
ЦТС-19	1725±325	563 (290)	0,40	100,0	200,0	2,7 – 3,3	50	7,00
ЦТСНВ-1	2250±560	513 (240)	0,45	165,0	400,0	2,85 – 3,05	70	7,30
ТВК-3	1200±200	368 (95)	0,20	43,3	83,3	4,50 – 5,00	300	5,30
ЦТС-23	1075±225	548 (275)	0,43	100,0	200,0	3,00 – 3,35	200	7,40
НЕС-1	1600±300	518 (245)	0,28	66,6	166,5	3,60 – 4,30	200	5,60
ЦТБС-3	2300±500	453 (180)	0,45	5 25,0	320,0	3,37 – 3,61	200	7,20
ТВКС	450±50	423 (150)	0,17	20,0	50,0	4,40 – 5,00	350	5,20
ЦТС-22	800±200	593 (320)	0,20	27,0	69,0	3,3 – 3,8	400	7,00
ЦТС-21	550±150	673 (400)	0,20	26,6	66,6	3,50 – 3,80	100	7,00
ЦТССт-1	1150±150	533 (260)	0,43	75,0	180,0	3,50	500	7,30

б) Питання для самоконтролю студентів:

1. Що таке прямий та зворотній п'єзоефект?
2. Чим відрізняється зворотній п'єзоефект від електрострикції?
3. В яких одиницях вимірюється п'єзомодуль?
4. Що означають параметри ϵ^T ; ϵ^S ?
5. Що означають параметри s^E ; s^D ?
6. Якого порядку швидкість звуку у п'єзокерамічних матеріалах?
7. Які основні хімічні компоненти п'єзокераміки ЦТБС?

Лабораторна робота № 1-6

Дослідження фазових переходів та діелектричних характеристик сегнетоелектриків

Мета роботи: Дослідження температурної залежності ϵ та $\text{tg}\delta$ сегнетоелектричних матеріалів, визначення типу сегнетоелектричних фазових переходів, розрахунок сталої Кюрі – Вейсса.

Теоретичний розділ

Сегнетоелектриками називають матеріали, у яких в деякому інтервалі температур існує спонтанна поляризація, напрям якої може бути змінений зовнішнім впливом (наприклад, електричним полем). В певному розумінні, сегнетоелектрики – це електричні аналоги феромагнетиків, Саме тому їх іноді називають фероелектриками, підкреслюючи тим самим аналогію між сегнетоелектриками та феромагнетиками.

Всі відомі на цей час сегнетоелектрики, які являють собою різні хімічні сполуки, можна поділити на два типи відповідно до характеру хімічного зв'язку, механізму фазового переходу, сукупності фізичних властивостей. До першого типу відносять сегнетоелектрики, в яких існують постійні електричні диполі. При зниженні температури в таких кристалах відбувається сегнетоелектричний фазовий перехід, при якому електричні моменти цих диполів упорядковуються в певних межах (в межах окремих доменів), що і призводить до виникнення спонтанної поляризації. До сегнетоелектриків такого типу відносяться так звані дипольні сегнетоелектрики, наприклад, сегнетова сіль, дігідрофосфат калію, та ін. До другого типу відносять сегнетоелектрики, які в більшості

являють собою іонні кристали, виникнення в яких спонтанної поляризації зумовлено зміщенням іонів при сегнетоелектричному фазовому переході, що і призводить до виникнення спонтанної поляризації. Класичним прикладом такого іонного сегнетоелектрика є титанат барію.

З точки зору термодинамічної теорії фазових переходів, перехід з параелектричного у сегнетоелектричний стан може відбуватися по різному. При так званому фазовому переході першого роду внутрішня енергія, спонтанна поляризація та деякі інші параметри сегнетоелектрика змінюються різко,- стрибком. А в разі фазового переходу другого роду ці параметри змінюються плавно, стрибком змінюються їх похідні по температурі,- наприклад, теплоємність.

Виникнення спонтанної поляризації у сегнетоелектриків призводить до цілого ряду специфічних електрофізичних явищ у цього класу матеріалів, а саме наявність петлі діелектричного гістерезису, екстремально високої діелектричної проникності, високої нелінійності діелектричних параметрів, п'єзо- та піро- ефектів, електрооптичних ефектів.

Основні діелектричні властивості сегнетоелектриків досить добре описуються в межах термодинамічної теорії. Згідно з цією теорією, діелектрична проникність сегнетоелектриків в слабких полях замінюється за законом Кюри-Вейсса:

$$\epsilon(T) = \frac{K}{T - \theta} \quad (6.1)$$

(вище температури фазового переходу), K - константа Кюри-Вейсса. θ – температура Кюри-Вейсса, яка в разі переходу другого роду співпадає з температурою фазового переходу T_ϕ .

$$\epsilon(T) = \frac{K}{2(\theta - T)} \quad (6.2)$$

(нижче температури фазового переходу).

На рис. 6-1 показані залежності ε ; $\text{tg}\delta$; $\frac{1}{\varepsilon}$; та P_s від температури для сегнетоелектриків з фазовим переходом першого роду (а), та фазовим переходом другого роду (б).

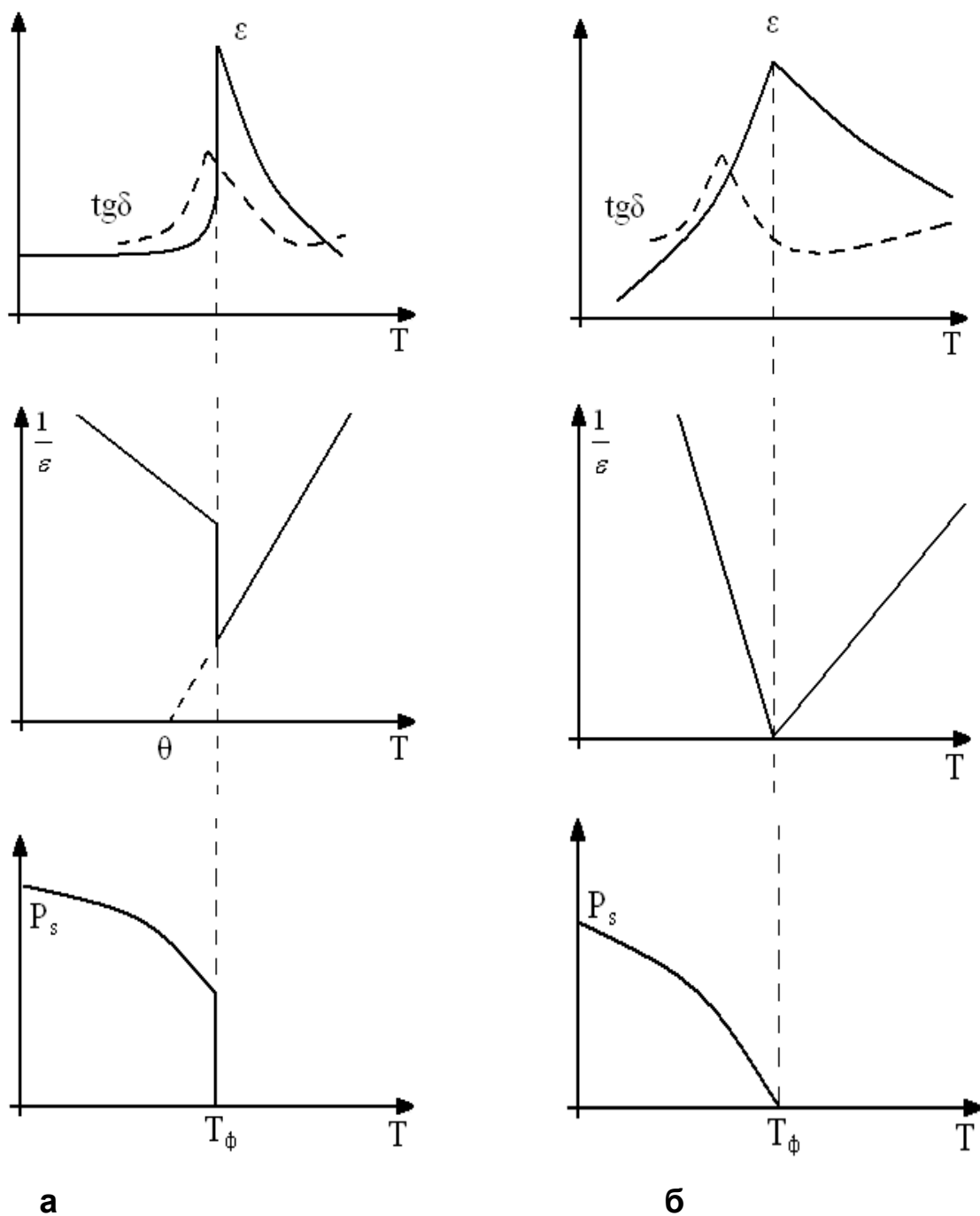


Рис.6.1.

Нижче температури фазового переходу в сегнетоелектриках утворюється полідоменна структура, при якій підсумковий дипольний момент сегнетоелектрика дорівнює нулю, а його внутрішня енергія мінімальна.

Якщо до полідоменного сегнетоелектрика прикласти електричне поле і повільно змінювати його величину, то воно викликає переорієнтацію дипольних моментів окремих доменів, внаслідок чого виникають нелінійні, гістерезисні явища. Петлею діелектричного гістерезису називають замкнену криву, що відображує залежність поляризованості або електричного зміщення від напруженості електричного поля, що періодично змінюється. Якісний вигляд петлі діелектричного гістерезису сегнетоелектриків зображено на рис. 6.2.

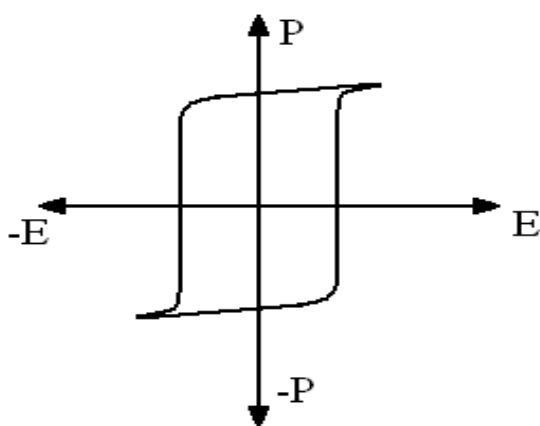


Рис. 6.2

Експериментальне обладнання та методика дослідження

Для дослідження температурної залежності ε та $\text{tg} \delta$ в слабких полях використовують вимірювальні мости та термостат, в якому розміщують зразки сегнетоелектричних матеріалів. При цьому вимірювальні прилади зазвичай дозволяють отримати безпосередньо значення ємності сегнетоелектричного зразка, тому величину відносної діелектричної проникності визначають шляхом її обчислення, найчастіше

через формулу ємності плаского конденсатора ($C = \frac{\epsilon \epsilon_0 S}{d}$, де S та d відповідні геометричні розміри зразка: площа електродів та товщина, які студенти отримують від викладача безпосередньо на Лабораторній роботі).

На Рис.6-3 наведена схема лабораторної установки для проведення експериментального дослідження.

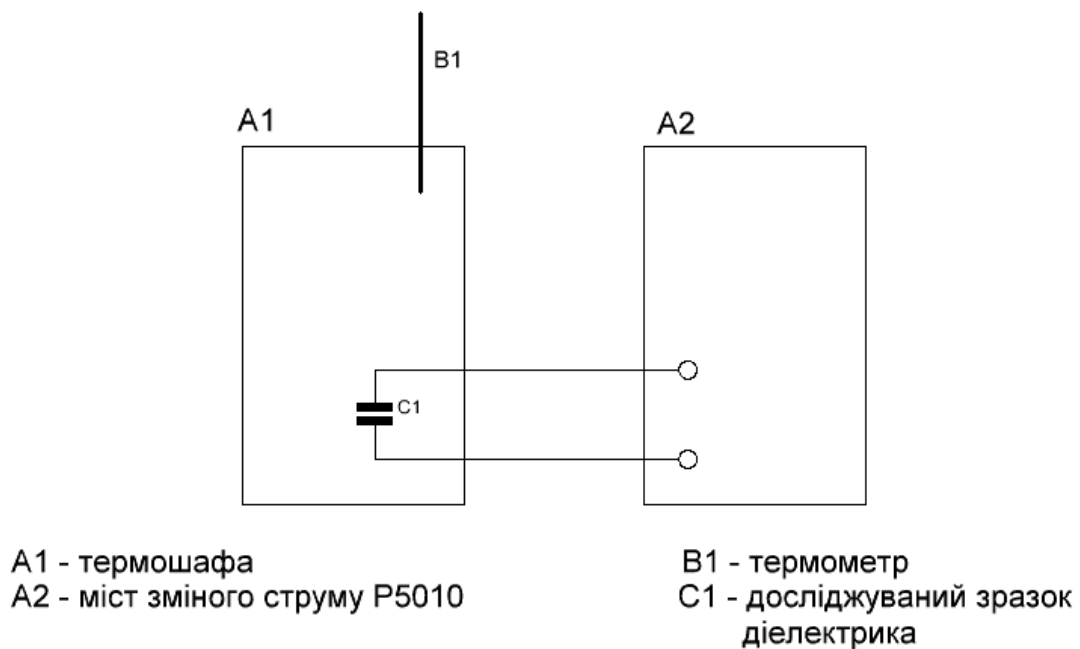


Рис.6-3. Схема вимірювань

Розрахунок сталої Кюри-Вейсса проводять як при температурі нижче температури фазового переходу, так і при температурі вище температури фазового переходу. Для отримання найбільш точних результатів обчислення доцільно брати температури при яких експериментальні точки на залежності $\frac{1}{\epsilon}(T)$, лежать на апроксимуючих прямих цієї залежності. Результати досліджень та розрахунків повинні бути зведені до єдиної Таблиці (можливий формат такої Таблиці наведено у Додатковій інформації до Лабораторної роботи).

Завдання

1. Ознайомитися з устаткуванням, методикою експериментального дослідження та зібрати схему вимірювань рис.6-3.
2. Ознайомитися з дослідними зразками.
3. Дослідити залежність ємності та $\operatorname{tg}\delta$ зразка від температури, результати вимірювань внести в Таблицю.
4. Розрахувати температурну залежність ϵ та побудувати її на одному графіку з температурною залежністю $\operatorname{tg}\delta$.
5. Побудувати графіки $\frac{1}{\epsilon}$ від температури, апроксимувати їх відповідно до типу фазового переходу.
6. Обчислити константу Кюри-Вейсса при температурах нижче та вище температури фазового переходу.
7. Зробити висновки по роботі.

Література

- [1] с. 261-273;
- [2] с. 365-380;
- [4] с. 143-160;
- [6] с. 32- 40;
- [7] с. 550- 566;
- [8] .

Додаткова інформація

а) Приклад Таблиці для занесення експериментальних та розрахункових даних.

$t^{\circ}\text{C}$	C, нФ	$\text{tg}\delta$	ϵ	$\frac{1}{\epsilon}$	$T^{\circ}\text{K}$
20					
...	...	...	...	...	...
...	...	...	...	...	...

б) Питання для самоконтролю студентів:

1. Які матеріали називають сегнетоелектриками ?
2. Що таке спонтанна поляризація?
3. Які причини можуть викликати появу спонтанної поляризації при сегнетоелектричному фазовому переході?
4. Чим відрізняються між собою фазові переходи першого та другого роду стосовно спонтанної поляризації сегнетоелектриків?
5. Що таке петля діелектричного гістерезису?
6. Для яких сегнетоелектриків температура фазового переходу співпадає з температурою Кюрі?
7. Які ефекти характерні для сегнетоелектричних матеріалів?

Лабораторна робота № 1-7

Вивчення основних характеристик нелінійних діелектриків

Мета роботи: експериментальне дослідження основних характеристик та параметрів нелінійних діелектриків.

Теоретичний розділ

Індукована електричним полем поляризація у першому наближенні (цілком прийнятному для більшості так званих лінійних діелектриків) лінійно залежить від напруженості електричного поля

$$\mathbf{P} = \epsilon_0(\epsilon - 1)\mathbf{E}, \quad (7.1)$$

де $\mathbf{P}$ – поляризованість, [Кл/м²]; ϵ – відносна діелектрична проникність; $\mathbf{E}$ – напруженість електричного поля, [В/м].

Однак в сильних електричних полях ця лінійна залежність порушується, оскільки відносна діелектрична проникність починає залежати від напруженості електричного поля $\epsilon(\mathbf{E})$. Достатньо помітною (а деяких матеріалів навіть придатною для практичного використання) ця нелінійність є для сегнетоелектричних та споріднених з ними матеріалів (наприклад, для параелектриків, тобто матеріалів які в звичайних умовах знаходяться при температурі вище температури сегнетоелектричного фазового переходу і для яких залежність $\epsilon(\mathbf{T})$ відповідає закону Кюрі -

Вейсса ($\epsilon(\mathbf{T}) = \frac{K}{T - \theta}$, де K - константа Кюрі-Вейсса. θ – температура Кюрі-Вейсса,). Для полідоменних сегнетоелектриків, вже у відносно слабких полях спостерігається суттєва залежність діелектричної проникності від напруженості змінного електричного поля. Це зумовлено додатковим вкладом, який вносить у загальну поляризацію орієнтація доменів під дією зовнішнього поля (т.з. «орієнтаційна поляризація»).

$$\mathbf{P}_{\Sigma} = \mathbf{P}_{\text{зв}} + \mathbf{P}_{\text{ор}} \quad (7.2)$$

де $\mathbf{P}_{\text{зв}}$ – звичайна поляризованість, $\mathbf{P}_{\text{ор}}$ – орієнтаційна поляризованість.

При збільшенні напруженості електричного поля все більша частина доменів починає приймати участь у орієнтаційній поляризації, що призводить до різкого зростання ϵ . Зростання ϵ відбувається до тих пір поки практично всі домени не приймуть участі у орієнтаційній поляризації.

Подальше збільшення напруженості електричного поля призводить до спаду ϵ , бо величина загальної поляризації матеріалу практично більше не змінюється (див. Рис. 7.1а). Для характеристики нелінійності і можливості порівняння між собою різних матеріалів використовують коефіцієнт нелінійності $K_{\sim}$, який дорівнює відношенню ϵ максимального до ϵ початкового ($K_{\sim} = \frac{\epsilon_{\text{макс}}}{\epsilon_{\text{поч}}}$), обов'язково вказуючи при цьому

напруженість електричного поля при якому досягається $\epsilon_{\text{макс}}$. Слід мати на увазі, що при зниженні температури орієнтаційна поляризація зменшується за рахунок підвищення коерцитивної сили доменів.

Якщо до сегнетоелектрика крім змінного електричного поля прикладається і постійне, то воно утруднює орієнтацію доменів відповідно до змінного поля і тим самим «виключає» домени з орієнтаційної поляризації, що призводить до зменшення діелектричної проникності (так звані «характеристики управління»). Відповідні залежності приведені на рис. 7-1б.

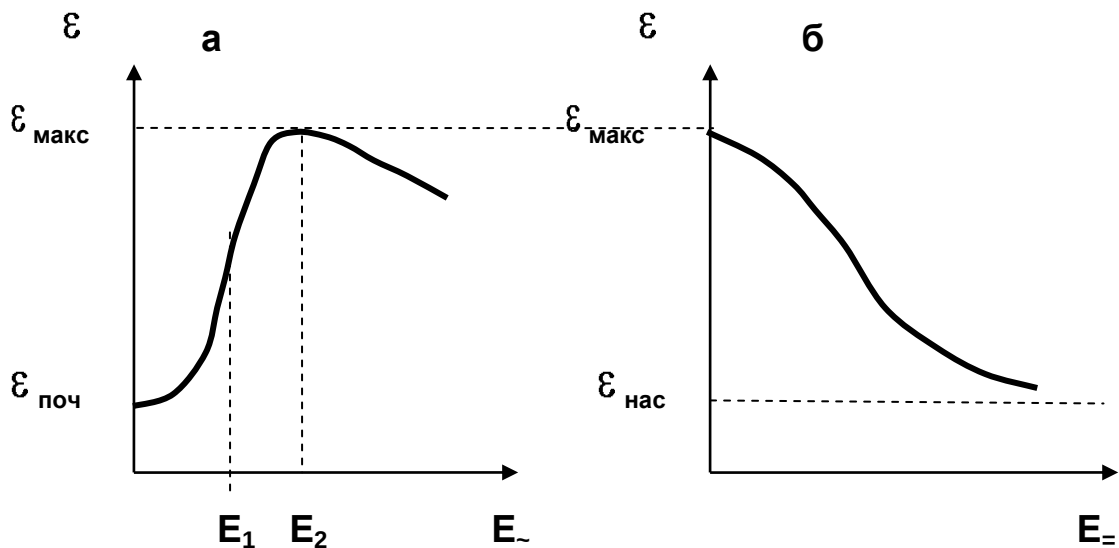


Рис.7-1 Характеристики нелінійності та управління.

Для оцінки характеристик управління зазвичай використовують коефіцієнт $K_{\pm} = \varepsilon_{\text{макс}} / \varepsilon_{\text{нас}}$

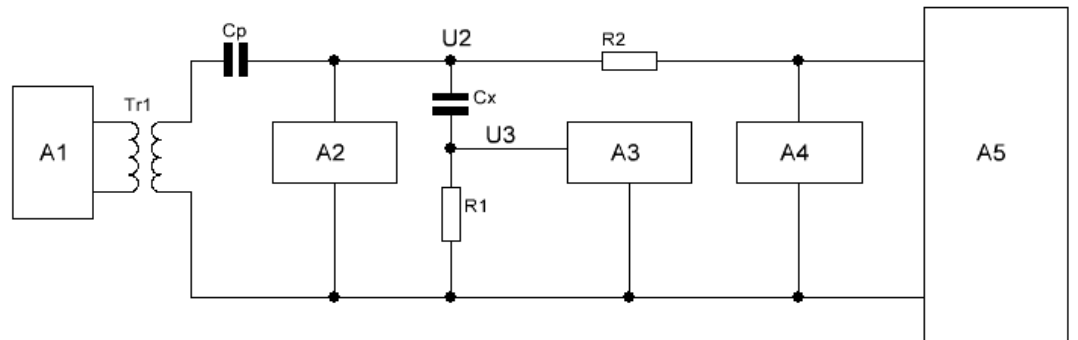
Діелектричні матеріали з високою нелінійністю, називають варикондами. Вони як правило виготовляються у вигляді сегнетокераміки на основі, BaTiO_3 , PbTiO_3 , PbZrO_3 , SrTiO_3 , ...

Залежність ε сегнетоелектриків від величини електричного поля дає можливість розробляти конденсатори, ємність яких можна змінювати прикладеною електричною напругою та реалізувати на їх основі діелектричні підсилювачі, частотні модулятори, множники частоти та т. і.

Експериментальне обладнання та методика дослідження

Для дослідження нелінійних явищ в варикондах при дії на них змінного електричного поля, або при одночасній дії змінного та постійного електричного поля, як правило, використовують схему, зображену на рис. 7-2. Схема складається з генератора А1, підвищувального трансформатора Tr1, конденсатора C_p , нелінійного

конденсатора C_x , вольтметрів змінної напруги **A2**, **A3**, вольтметра постійної напруги **A4**, опорів R_1, R_2 , джерела постійної напруги **A5**.



A1- генератор
A2, A3 - вольтметри змінної напруги
Cx- конденсатор із сегнетоелектричним діелектриком
A4 - вольтметр постійної напруги
A5 - джерело постійної напруги

Рис.7-2. Схема вимірювань

Розрахунок ємності нелінійного конденсатора C_x при використанні цієї схеми може бути проведено за формулою

$$C_x = \frac{U_{R1}}{U_{Cx} R_1 \omega} \quad (7.3)$$

де U_{R1} - падіння напруги на опорі R_1 ; U_{Cx} - змінна напруга на конденсаторі C_x ; ω – кругова частота, U_{Cx} дорівнює різниці показань вольтметрів **A2** та **A3**: $U_{Cx} = (U_2 - U_3)$. Для розрахунку відносної діелектричної проникності матеріалів відповідно до встановленої

величини C_x використовується загальновідома формула $\epsilon = \frac{C_x \cdot d}{\epsilon_0 \cdot S}$, де

S та d геометричні розміри плаского конденсатора який являє собою досліджуваний зразок.

Додатковий опис схем або установок для проведення дослідження конкретних зразків матеріалів, їх геометричні розміри, методичні вказівки щодо проведення дослідження студенти отримують від викладача безпосередньо на лабораторному занятті.

Завдання

1. Ознайомитися з устаткуванням, методикою експериментального дослідження та зібрати схему вимірювань (рис.7-2).
2. Ознайомитися з дослідними зразками.
3. Зняти залежність U_3 від U_2 (в межах вказаних викладачем) та розрахувати $U_{Cx} = U_2 - U_3$ та залежність C_x від U_{Cx} .
4. Відповідно до геометричних розмірів нелінійного плаского конденсатора розрахувати та побудувати залежність ϵ_x від U_{Cx} , визначити $K_{\sim}$.
5. Встановити напругу U_{Cx} яка відповідає максимальному значенню ϵ_x , та дослідити залежність ϵ_x від величини постійної напруги U_4 .
6. Побудувати залежність ϵ_x від величини постійної напруги. визначити $K_{\sim}$.
6. Зробити висновки по роботі.

Література

- [3] с. 433– 441.
[6] с. 39-40 .
[7] с. 574-579.

Додаткова інформація

а). Параметри та характеристики деяких марок промислової варикондової кераміки .

Матеріал	Температура фазового переходу, °C	$\epsilon_{\text{початкова}}$	$\epsilon_{\text{макс. при } E_{\text{макс}}}$	$E_{\text{макс}}$ В/мм	$K_{\text{~}}$
Ва TiO₃ (для порівняння)	120	1500-2000	6000-8000	600-800	1,5-2
ВК – 1	75±10	2300-2500	16000 - 20000	150-200	≥ 4
ВК – 2	75±10	2000-2500	40000 - 50000	120-150	≥ 8
ВК - 4	105±10	1800-2000	20000- 35000	250-300	≥ 8
ВК - 5	75±10	2000-2500	80000- 100000	80-100	≥ 20
ВК - 6	200±20	400-500	10000 - 22000	500-600	≥ 8

б) Питання для самоконтролю студентів:

1. В яких матеріалах суттєво проявляється діелектрична не лінійність?
2. Чим зумовлено аномальне зростання відносної діелектричної проникності сегнетоелектриків при зростанні напруженості змінного електричного поля ?.
3. З чим пов'язані характеристики управління нелінійних діелектриків?
4. Яким параметром характеризується нелінійність діелектричних матеріалів ?
5. Яким параметром характеризується характеристика управління?
6. На основі яких хімічних сполук виготовляють варикондову кераміку?
7. Які основні напрямки використання варикондів ?

Література:

1. Пасынков В.В., Сорокин В.С. Материалы электронной техники. – СПб.: «Лань», 2003.
2. Поплавко Ю.М., Физика диэлектриков. – Киев: Вища шк., – 1980.
3. Поплавко Ю.М., Фізика діелектриків. - К.: НТУУ «КПІ», 2015
4. Поплавко Ю.М., Переверзєва Л.П., Воронов С.О., Якименко Ю.І. Фізичне матеріалознавство. Ч.2 , Діелектрики. - К.: НТУУ «КПІ», 2007
- 5 Текст лекцій з дисципліни “Матеріалознавство радіоелектронної апаратури ”. Розділ «Діелектрики». Пр.№05/2018 від 21.05. 2018, ФЕЛ.
6. Текст лекцій з дисципліни “Матеріалознавство радіоелектронної апаратури ”. Розділ «Активні діелектрики». Пр.№06/2016 від 27.06. 2016, ФЕЛ.
7. Справочник по электротехническим материалам. В 3-х томах, Т.3.,- Л: Энергоатомиздат. - 1988.
8. ГОСТ 21515–78. Материалы диэлектрические. Термины и определения.
9. ГОСТ 12370–80. Материалы пьезокерамические. Методы испытания.