

Міністерство освіти і науки, молоді та спорту України
Державний вищий навчальний заклад
«Національний гірничий університет»

Методичні вказівки
до лабораторної роботи
№ 4.27.2

ВИВЧЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ СЕГНЕТОЕЛЕКТРИКІВ

г. Дніпропетровськ
2011

Електродинаміка. Частина II. Матеріали методичного забезпечення дисципліни «Фізика» для студентів усіх спеціальностей. / Л.І. Барташевська, А.С. Зайцев, В.М. Мандрікевич, Т.В. Морозова, А.В.Чернай, – Д.: Національний гірничий університет, 2011

Автори:

Л.І. Барташевська, А.С. Зайцев, кандидати фіз.-мат. наук;
В.М. Мандрікевич, Т.В. Морозова, старші викладачі;
А.В. Чернай, д-р фіз.-мат. наук, професор.

Усі укладачі приймали участь в розробці методичних вказівок до лабораторних робіт та удосконаленні їх макетів.

Затверджено до видання редакційною радою НГУ (протокол № від) за наказом методичної комісії напряму підготовки 6.050301 Гірництво (протокол №_від_2011р.)

Методичні матеріали призначені для самостійної підготовки студентів усіх інженерних спеціальностей до лабораторних робіт та контролю практичних і лабораторних занять з нормативної дисципліни «Фізика».

Розглянуто теоретичні відомості, прилади та установки, що використовуються у лабораторних роботах.

Рекомендації орієнтовано на активацію навчальної діяльності студентів.

Відповідальний за випуск завідувач кафедру фізики, канд.фіз.-мат., наук, проф. І.П. Гаркуша.

ВИВЧЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ СЕГНЕТОЕЛЕКТРИКІВ

Прилади та обладнання: 1) касета ФПЕ-02; 2) джерело живлення; 3) електронний осцилограф.

Мета роботи: використання отриманої на екрані осцилографа максимальної петлі гістерезиса сегнетоелектрика та окремих циклів для визначення: 1) залежності діелектричної проникності сегнетоелектрика від напруженості електричного поля E ; 2) коерцитивної сили E_c ; 3) залишкової індукції D ; 4) тангенса кута діелектричних втрат.

Опис приладу та теоретичні відомості

Для описання електричного поля в діелектриках, крім основної характеристики поля – вектора напруженості електричного поля \vec{E} , використовують вектор електричного зміщення (вектор електростатичної індукції) \vec{D} . Він не є чисто польовим вектором, оскільки враховує поляризованість середовища. Зв'язок між ними можна відобразити залежністю

$$\vec{D} = \varepsilon_0 \varepsilon \vec{E},$$

де ε – діелектрична проникність середовища.

Сегнетоелектрики – це кристали, які у визначеному температурному інтервалі спонтанно (самочинно, тобто при відсутності зовнішнього електричного поля) електрично поляризовані. Таку назву вони отримали по першій досліджуваній речовині – сегнетовій солі.

Сегнетоелектрики мають деякі своєрідні особливості.

1. Діелектрична проникність сегнетоелектриків надзвичайно велика ($\varepsilon \sim 10^4$), тоді як у більшості звичайних діелектриків діелектрична проникність складає кілька одиниць.

2. Діелектрична проникність сегнетоелектриків залежить від напруженості електричного поля.

3. Через те, що ε залежить від E , то D нелінійно залежить від E . Сегнетоелектрикам властивий сегнетоелектричний гістерезис (відставання, запізнення), який виникає при переорієнтації напрямку зовнішнього поля. Як видно з рис.1, зі збільшенням напруженості E зовнішнього електричного поля зміщення D зростає і досягає насичення (у точці A). Якщо потім напруженість зовнішнього поля зменшувати і довести до нуля, D , зменшуючись, досягне значення $D_{зал}$ (залишкове зміщення). І тільки при накладенні певного поля зворотного напрямку ($-E_k$) зміщення зникає повністю. Величину E_k називають коерцитивною силою. При подальшому збільшенні від'ємного значення E знову досягається насичення (точка M). Наступній зміні E відповідає ділянка MFA . Залежність D від E при замкненому циклі переорієнтації зовнішнього поля називають петлею гістерезису (крива $ABCMFA$). Пунктиром на рисунку показаний окремий цикл, коли насичення не досягається. Окремих циклів може бути безліч, при цьому максимальні значення D завжди знаходиться на основній кривій OA .

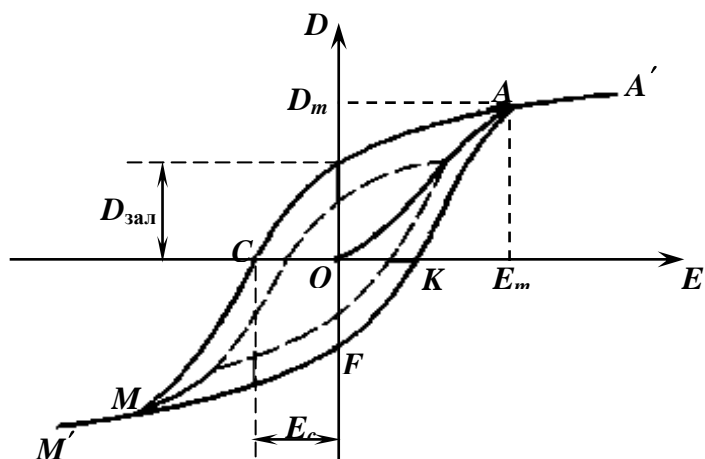


Рис. 1

4. При підвищенні температури вище за певне значення T_k , характерне для кожного сегнетоелектрика, його сегнетоелектричні властивості зникають і він перетворюється у звичайний полярний діелектрик. Точку фазового переходу із стану сегнетоелектрика в стан полярного діелектрика називають точкою Кюрі, а відповідну їй температуру – температурою Кюрі T_k .

Спонтанна поляризація є джерелом значних електричних полів. Тому, якщо макроскопічний об'єм сегнетоелектрика спонтанно є поляризованим у якомусь напрямку, то навколо цього об'єму виникає дуже значне електричне поле, з яким зв'язана велика енергія поля.

Такий стан – енергетично не вигідний. Система намагається перейти у такий стан, щоб, з одного боку, існувала спонтанна поляризація, а з іншого – енергія поля була б мінімальною. Це може здійснитися у результаті поділення об'єму сегнетоелектрика на малі області, у кожній з яких існує спонтанна поляризація у деякому визначеному напрямку, неоднаковому для різних областей. Середня поляризованість об'єму, який складається з достатнього числа малих областей з різними напрямками спонтанної поляризації, дорівнює нулю, і тому напруженість зовнішнього електричного поля, яке створюється цим об'ємом, близька до нуля. Малі області зі спонтанною поляризацією називаються діелектричними доменами або просто доменами. Процес зміни поляризованості сегнетоелектрика у зовнішньому електричному полі полягає у переорієнтації дипольних моментів окремих доменів, у зміні об'ємів і переміщенні границь між доменами.

Усі сегнетоелектрики, які знаходяться в електричному полі, що змінюється, мають діелектричні втрати. Такими втратами називають ту частину енергії змінного електричного поля, яка перетворюється в тепло. Діелектричні втрати в сегнетоелектриках зумовлені процесом реполяризації (переорієнтації доменів), тобто переходом кристала із стану, який характеризується точкою A (рис.1), в стан, який характеризується точкою M. Інакше кажучи, діелектричні втрати в сегнетоелектриках зумовлені гістерезисом. Втрати енергії змінного поля в сегнетоелектриках оцінюють тангенсом діелектричних втрат, тобто

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{\omega_{\text{непiод}}}{\omega_{\text{max}}}, \quad (1)$$

де $\omega_{\text{непiод}}$ – втрати енергії змінного діелектричного поля на гістерезис в одиниці об'єму сегнетоелектрика за період;

ω_{max} – максимальна густина енергії електричного поля у кристалі сегнетоелектрика.

Об'ємна густина енергії електричного поля

$$\omega = \frac{\varepsilon_0 E^2}{2} = \frac{ED}{2}. \quad (2)$$

При збільшенні напруженості поля на величину dE об'ємна густина енергії також зміниться на величину

$$d\omega = Ed(\varepsilon_0 E) = EdD. \quad (3)$$

За період зміни електричного поля втрата енергії

$$\omega = \oint EdD, \quad (4)$$

що чисельно збігається з площею петлі гістерезису в координатах X і Y .

Максимальна густина енергії електричного поля у кристалі

$$\omega_{max} = \frac{E_m D_m}{2}, \quad (5)$$

де E_m і D_m – максимальні значення напруженості електричного поля \vec{E} і вектора \vec{D} .

З урахуванням формул (1), (4) і (5) для тангенса діелектричних втрат отримаємо такий вираз:

$$tg \delta = \frac{2 \oint EdD}{E_m D_m} = 2 \frac{S_{II}}{x_m y_m}, \quad (6)$$

де S_{II} – площа петлі гістерезису в координатах X, Y ; x_m, y_m – координати вершин петлі гістерезису.

Щоб отримати петлю сегнетоелектричного гістерезису ($D = f(E)$) на екрані осцилографа, треба на вертикально відхилювальні пластини подати напругу U_y , пропорційну модулю вектора електричного зміщення (вектору індукції) \vec{D} ($U_y \sim D$), а на горизонтально відхилювальні – напругу U_x , пропорційну напруженості поля \vec{E} ($U_x \sim E$).

Принципова схема експериментальної установки наведена на рис.2.

До двох послідовно з'єднаних конденсаторів C_0 і C приєднано джерело змінної напруги.

Між пластинами конденсатора C знаходиться досліджуваний сегнетоелектрик.

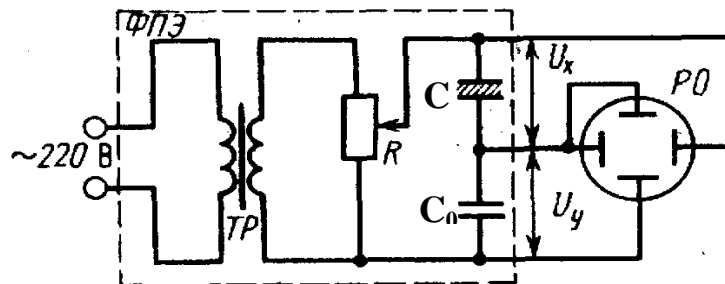


Рис.2

Індукція електростатичного поля (зміщення) D усередині сегнетоелектрика дорівнює поверхневій густині σ зарядів на пластинах конденсатора: $D = \sigma$.

Але $\sigma = \frac{q}{S}$, де S – площа пластин конденсатора C ; q – заряд однієї з пластин цього конденсатора. Тоді $D = \frac{q}{S}$. Оскільки конденсатори C і C_0 з'єднані послідовно, то заряди їх однакові. Тому напруга на конденсаторі C_0

$$U_{C_0} = \frac{q}{C_0} = \frac{DS}{C_0}.$$

Напруга на конденсаторі C_0 , яка подається на вертикально відхилювальні пластини осцилографа, пропорційна вектору зміщення \vec{D} .

$$U_y = U_{C_0} = \frac{DS}{C_0}, \quad (7)$$

де $C_0 = 0,22 \cdot 10^{-6} \text{ Ф}$; $S = 1,3 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$.

Таким чином, напруга, яка подається на вхід Y осцилографа, пропорційна вектору електричного зміщення (вектору індукції) \vec{D} електричного поля.

Відхилення електронного променя по вертикалі пропорційне напрузі U_y , яка подається на вхід Y осцилографа.

$$y = \frac{U_y}{b_2}, \quad (8)$$

де b_2 – чутливість осцилографа по вертикальній осі.

Із співвідношень (7) і (8) отримаємо, що

$$D = \frac{C_0 b_2}{S} y. \quad (9)$$

Тепер переконаємося, що напруга, яка створюється конденсатором C , пропорційна напруженості поля E . У таких схемах вимірювань (рис.2) ємність конденсатора C значно менша ємності конденсатора C_0 . Через те що опір конденсатора змінному струму обернено пропорційний ємності ($R_c = \frac{1}{\omega \cdot C}$), то практично вся напруга, яка знімається з дільника R , прикладена до конденсатора C із сегнетоелектриком. Ця напруга зв'язана з напруженістю поля E у сегнетоелектрику співвідношенням

$$U_x = E \cdot h, \quad (10)$$

де h – товщина сегнетоелектрика ($h = 3 \cdot 10^{-3} \text{ м}$).

Таким чином, на горизонтально відхилювальні пластини осцилографа подається напруга U_x , пропорційна напруженості зовнішнього електричного поля.

Якщо відома чутливість b_1 осцилографа по горизонтальній осі, то

$$U_x = b_1 x, \quad (11)$$

де x – відхилення електронного променя вздовж осі X ; $b_1 = 0,033 \text{ В/см}$.

Із співвідношень (10) і (11) отримаємо, що

$$E = \frac{b_1}{h} x . \quad (12)$$

Отже, у цій схемі на входи X і Y осцилографа одночасно подаються напруги $U_x \sim E$ і $U_y \sim D$. У результаті на екрані осцилографа спостерігається фігура Ліссажу, яка у даному разі і буде петлею гістерезису (рис.1).

Розглянемо основну криву поляризації – OA (рис.1), яка є геометричним місцем точок вершин кривих окремих циклів. Для кожної точки цієї кривої можна вважати, що величина зміщення $D = \varepsilon_0 \varepsilon E$. Тоді, визначивши величини D і E вершин окремих циклів, можна розрахувати відповідне значення діелектричної проникності сегнетоелектрика за формулою

$$\varepsilon = \frac{D}{\varepsilon_0 E} = \frac{h C_0 b_2 y}{\varepsilon_0 S b_1 x} \quad (13)$$

і отримати залежність $\varepsilon = f(E)$.

Послідовність вимірювань

1. Складіть схему установки відповідно до маркування на касеті (рис. 3).
2. Приєднайте електронний осцилограф і джерело живлення до мережі.
3. Підготуйте електронний осцилограф до роботи у режимі спостереження фігур Ліссажу.
4. Подайте живлення на лабораторний стенд та прилади. Установіть світну точку в центр екрана осцилографа.

Завдання 1. Отримання кривої $\varepsilon = f(E)$

1. Переконайтеся, що за відсутності напруги на конденсаторах світна точка на екрані осцилографа знаходиться у центрі екрана.

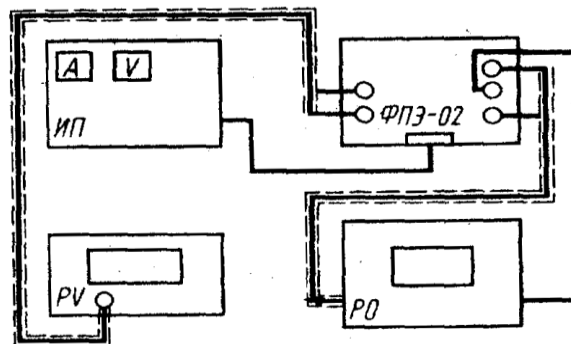


Рис. 3

2. Регулюючи потенціометром R на касеті напругу та підсилення сигналу по осі Y осцилографа, отримайте максимальну петлю гістерезису, яка буде відповідати максимальному стану насичення поляризації сегнетоелектрика. Площа петлі гістерезису при цьому повинна займати всю площину екрана осцилографа.

3. Запишіть у таблицю координати x_m і y_m вершини петлі гістерезису (точка А).

4. Зменшуючи поворотом ручки потенціометра R на панелі касети напругу, отримайте ще 4 – 5 петель гістерезису. Занесіть у таблицю координати x і y їх-

ніх вершин. У разі необхідності змініть чутливість осцилографа по вертикалі b_2 . При цьому треба врахувати, що величина b_2 прийме нове значення.

5. За формулами (12), (13) обчисліть значення ε і E та занесіть їх у таблицю.

№ петлі	x , см	y , см	b_2 , В/см	ε	E , В/м
1					
2					
3					
4					

Завдання 2. Визначення залишкової індукції $D_{зл.}$ та коерцитивної сили E_c

1. Установіть на екрані максимальну петлю гістерезису.
2. Найдіть за допомогою координатної сітки екрана осцилографа координату $y_{зл.}$, яка відповідає залишковій індукції, координату x_c , яка відповідає коерцитивній силі (з точністю до 0,1 поділки шкали екрана осцилографа).
3. За формулами (9) і (12) розрахуйте коерцитивну силу і залишкову індукцію.

Завдання 3. Визначення тангенса кута діелектричних втрат

1. Отримайте на екрані осцилографа максимальну петлю гістерезису.
2. Найдіть за допомогою координатної сітки екрана осцилографа координати x_m і y_m вершини цієї петлі.
3. Накресліть у координатах $y = f(x)$ петлю гістерезису, дотримуючись масштабу, визначте її площу.
4. Розрахуйте $tg\delta$ за формулою (6).

Контрольні питання

1. Що являє собою поляризація діелектриків?
2. Як пов'язана напруженість електричного поля в діелектрику з його діелектричною проникністю?
3. Які основні властивості мають сегнетоелектрики?
4. Що розуміють під діелектричними втратами?

Література

1. Кучерук І.М., Горбачук І.Т., Луцик П.П. Загальний курс фізики. – К.: Техніка, 2001. – Т.2. с. 92 –98.