

ЕЛЕКТРОНІКА

УДК 621.38

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.1.2/42>**Воронов С.О.**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**Поплавко Ю.М.**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ДЕЯКІ АСПЕКТИ ЕЛЕКТРИЧНО ІНДУКОВАНОЇ П'ЄЗОЕЛЕКТРИКИ

Стаття присвячена окремим аспектам електрично індукованої п'єзоелектрики. Лінеаризована електрострикція, що виникає під дією сильного електричного поля у твердому діелектрику, що відома як квазілінійний електромеханічний ефект, схожий на п'єзоелектрику. Цей ефект спостерігається в електричному полі типу зміщення і пропорційний квадрату діелектричної проникності. У даній статті розкриті окремі дискусійні питання щодо діелектричної проникності та аналізуються фізичні механізми виникнення електромеханічного ефекту в п'єзоелектриках, піроелектриках та релаксорних сегнетоелектриках з урахуванням інерційності електромеханічного відклику. Електрично індукована п'єзоелектрика є максимальною в діелектриках, що мають високу діелектричну проникність, ефективність якої забезпечується малоінерційною квазіпружною поляризацією. Для оцінки максимальної ефективності різних п'єзоелектричних матеріалів використовується метод діелектричної спектроскопії. Даний метод дозволяє контролювати вплив механізмів електричної поляризації на параметри прояву електромеханічних ефектів та їх інерційність. Підтверджено, що поляризаційні механізми у п'єзокераміці обмежують швидкість електромеханічних процесів в СВЧ-діапазоні, а в п'єзокристалах – практично не обмежують. Встановлено, що використання у якості електромеханічних пристроїв нелінійних сегнетоелектриків п'єзоелектричного типу є недоцільним, як через сильний гістерезис, так і через інерційність перемикавання доменів. Хоча дані електромеханічні пристрої і мають велику електромеханічну реакцію (відклик), інерційність перемикавання доменів для об'ємних структур обмежена частотою в кілогерц, а для плівок – в кілька мегагерц. Зазначений електромеханічний ефект у піроелектриках значно нижчий та менш керований, вони практично безінерційні та їх використання можливе у вузькому діапазоні температур. Релаксорні сегнетоелектрики забезпечують великий і практично безгістерезисний ефект. Зазначений ефект суттєво знижується на високих частотах – кілогерцових і особливо на мегагерцових, релаксорні сегнетоелектрики успішно використовуються в актуаторних пристроях для отримання та технічного застосування електрично індукованого п'єзоефекту.

Ключові слова: п'єзоелектрики, піроелектрики, сегнетоелектрики, електрична поляризація, діелектричні властивості.

Постановка проблеми. Діелектричні матеріали, що використовуються для отримання електрично індукованого п'єзоефекту в останні роки успішно реалізовані для технічного застосування. Фізичні механізми, що дозволяють отримати даний ефект дуже різноманітні та можуть діяти одночасно. А тому для встановлення їх відмінностей використовується метод діелектричної спектроскопії, що дозволяє на різних частотах визначити межі застосування електрично індукованого п'єзоефекту.

Ефективний електромеханічний ефект отриманий шляхом застосування електричного поля до

діелектрика безпосередньо впливає на його електричні та механічні властивості різною мірою посилюючи їх зв'язок та певну взаємозалежність між ними. Метод діелектричної спектроскопії на мікроскопічному рівні дозволяє встановити поляризованість діелектрика, що під впливом електричного поля істотно змінюється. Таким чином поляризованість діелектрика не залишається постійним параметром, який не залежить від електричного поля, так як сильне поле змінює міжатомні зв'язки у структурі діелектрика, що й приводить до зміни поляризованості – появи нелінійної поляри-

зації діелектрика. Саме поява нелінійної поляризації діелектрика забезпечує електричний контроль різних параметрів, які традиційно вважалися незалежними від дії сильного електричного поля. У зв'язку з цим, необхідно розглядати електрично індукований п'єзоэффект як вплив механізмів електричної поляризації на параметри прояву електромеханічних ефектів та їх інерційність із застосуванням методу діелектричної спектроскопії.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Роботи вітчизняних та зарубіжних вчених, що присвячені діелектричній спектроскопії як методу дослідження непровідних (або слабопровідних) речовин у широкому діапазоні частот ($10^{-3} \dots 10^{16}$ Гц) дозволили встановити природу діелектричної проникності та механізми втрат електричної енергії під час поляризації [1–6].

Відомо, що більш чутливими до дії електричного поля, під впливом якого змінюється електромеханічний зв'язок у структурі діелектрика, який, у свою чергу, впливає на його проникність ϵ , відповідно, й іншу поляризацію – полярні діелектрики ϵ , особливо, сегнетоелектрики та споріднені матеріали [3]. Можливість управляти параметрами діелектрика пов'язана із зміною структури атомів (зниження жорсткості їх зв'язку) під дією електричного поля, що знижує їх поляризованість та інші параметри, що ним визначаються та впливає на обмеження свободи переорієнтації їх полярних елементів [5]. Так відомо, що в діелектрики, що мають діелектричну проникність $\epsilon = 10^3 - 10^5$ електрично індуковані та п'єзоелектричні ефекти можуть бути настільки великими, що перевищують звичайні ефекти за своєю ефективністю [4]. А отже, впливовий ефективний контроль електромеханічних властивостей діелектрика можливий лише у діелектриках з високою діелектричною проникністю, яка може відрізнитися в п'єзоелектриках, піроелектриках і сегнетоелектриках релаксатора завдяки чутливості до електричного поля та їх еластичної податливості [7].

Постановка завдання. Електрично індукована п'єзоелектрика приймає максимальні значення в діелектриках з високою діелектричною проникністю, а їх висока ефективність забезпечується механізмами малоінерційної квазіпружної поляризації. З метою оцінки максимальних значень ефективності різних п'єзоелектричних матеріалів використовується метод діелектричної спектроскопії.

Даний метод дозволяє контролювати вплив механізмів електричної поляризації на параметри прояву електромеханічних ефектів та їх інерцій-

ність. Метою цієї статті є уточнення фізичних уявлень про природу електрично індукованих або контрольованих п'єзоелектричних ефектів. Для їх розуміння аналізуються фізичні механізми виникнення такого ефекту в п'єзоелектриках, піроелектриках та релаксорних сегнетоелектриках з урахуванням інерційності електромеханічного відгуку.

Виклад основного матеріалу. Поляризація, що індукована зовнішнім електричним полем, описується діелектричною проникністю ϵ . Даний параметр ϵ , так само, як і магнітна проникність μ та електрична провідність σ , у класичному розумінні впливає з рівнянь Максвелла, які були уперше виведені Лоренцом понад 100 років тому. Дані розрахунки проводилися за фізично нескінченно малими проміжком часу і об'ємом. Де таким часом можна вважати $\tau \leq 10^{-14}$ с, а об'єм вимірюється радіусом, що дорівнює приблизно десяти міжатомних відстаней у речовині. Натепер класична діелектрична проникність ϵ , потребує уточнення у зв'язку з величезною кількістю різноманітних даних, отриманих різними експериментальними методами для різних діелектриків.

Як відомо, ступінь впливу електричного поля на п'єзоелектричні та інші властивості діелектрика визначається величиною діелектричної проникності. Так електрично викликана п'єзоелектрична активність пропорційна квадрату діелектричної проникності. У більшості діелектриків вплив електричного поля на основні параметри незначний, а діелектрична проникність $\epsilon \leq 10$. Проте в діелектриках, що мають $\epsilon = 10^3 - 10^5$, електрично індуковані та п'єзоелектричні ефекти можуть бути настільки великими, що перевищують звичайні ефекти за своєю ефективністю [4]. Тому впливовий ефективний контроль електромеханічних властивостей діелектрика можливий лише у діелектриках з високою діелектричною проникністю, яка може відрізнитися в різних типах діелектриків завдяки їх чутливості до електричного поля та еластичності [7].

Нами розкриті деякі дискусійні питання про природу електрично індукованих або контрольованих п'єзоелектричних ефектів. Зокрема, аналізуються фізичні механізми виникнення такого параметру як діелектрична проникність у п'єзоелектриках, піроелектриках та релаксорних сегнетоелектриках з урахуванням інерційності електромеханічного відгуку.

У будь-якому твердому діелектрику вплив електричного поля викликає електричну поляризацію, що супроводжується електрострикцією. Даний квадратичний ефект дуже малий, проте

в діелектриках, що мають велику діелектричну проникність, зокрема, піроелектрики та релаксорні сегнетоелектрики, навпаки.

Так під впливом поля зміщення в цих діелектриках електрострикція перетворюється в індуквану п'єзоелектрику, яка може бути більшою, ніж звичайний п'єзоелектричний ефект. Головною причиною цих ефектів є електрострикція, що змінює симетрію будь-якого ізотропного діелектрика, який стає ніби то полярним – нецентросиметричним. Таким чином шляхом зміни електричного поля зміщення можна контролювати як полярно-активну структуру, що природньо існує в кристалі, так і структуру індуквану в неполярному матеріалі.

Поляризаційні процеси, властивістю яких є діелектрична проникність характеризують електрично індуквану п'єзоелектрику. А тому за частотною залежністю діелектричної проникності $\epsilon(\omega)$ можна здійснювати оцінку інерційних властивостей електромеханічного управління. Так інерційність п'єзоефекту проявляється у частотних областях, де спостерігається діелектрична дисперсія, так як поляризація встановлюється із запізненням у часі [7].

Розглянемо наведене судження про частотну межу встановлення п'єзоефекту до нелінійних п'єзоелектриків у випадку зміни швидкості звуку внаслідок електромеханічної дії.

Більшість нелінійних п'єзоелектриків це полікристалічні сегнетоелектрики, серед яких неполяризована кераміка виявляє високоефективний електричний контроль швидкості звуку, діелектрична проникність якої $\epsilon \sim 1000$. Цей матеріал

є «гнучким» сегнетоелектриком, в якому сила внутрішньокристалічного зв'язку може бути порівнянна з впливом електричного поля. Широкий діапазон зміни швидкості звуку зумовлений переорієнтацією структурних доменів сегнетоелектрика, що у свою чергу пояснює виражений гістерезис керуючих параметрів.

Методом діелектричної спектроскопії оцінюють інерцію електричного контролю електромеханічних властивостей у сильному електричному полі (рис. 1, криві 2 і 3 в області I) [7].

На рис. 1 крива 3 описує ефективну діелектричну проникність ϵ'_{ef} та коефіцієнт втрат ϵ''_{ef} , що отримані шляхом усереднення діелектричної реакції за один період змінного поля. Крива 2 (рис. 1) показує діелектричну проникність ϵ' і коефіцієнт втрат ϵ'' , що виміряні у слабкому електричному полі підвищеної частоти з одночасним перемиканням домену сильним низькочастотним полем.

Так діелектрична проникність у сильних полях (області I) на два порядки вище порівняно з слабким електричним полем (області II, III), тоді як дисперсійна частота сильного поля в мільйон разів нижча порівняно з слабким.

За результатами вимірювання в сильних полях, встановлено, що контроль переорієнтації домену, що призводить до гістерезисної залежності нелінійного типу. Де у полікристалічних сегнетоелектриках максимальна частота перемикання доменів можлива лише за частот порядку кілогерц, а в тонких плівках вона зростає до мегагерц.

Необхідно зазначити, що в сильних електричних полях виявлено декілька механізмів поляри-

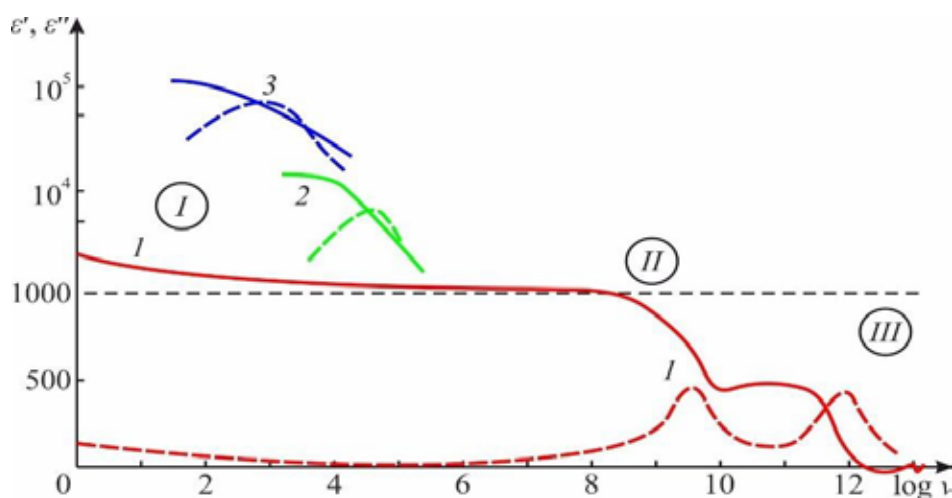


Рис. 1. Дисперсія діелектричної проникності в сегнетоелектричній фазі BaTiO_3 , де $\epsilon'(\nu)$ суцільними кривими показана залежність, а $\epsilon''(\nu)$ пунктирними кривими); I – низькі частоти, сильні електричні поля, II – мікрохвильова область, слабкі поля; III – частоти інфрачервоного діапазону, слабкі поля

зації сегнетоелектриків, що сприяє більш швидкій поляризації в полярних кластерах, що локалізовані в доменних стінках. Так у сильному електричному полі (рис. 1, область I крива 2), внесок механізму поляризації на порядок менший, ніж у кривий 3. Даний механізм можна виміряти за допомогою височастотної фільтрації відгуку (зміна швидкості звуку) під час одночасного перемикування доменів на низьких частотах. Отже використання нелінійних п'єзоелектриків, зокрема, сегнетоелектриків для створення електро механічних та п'єзоелектричних пристроїв не є доцільним як через сильний гістерезис, так і через інерційність перемикування доменів.

Піроелектрики мають діелектричну проникність, що майже не розсіюється до міліметрових хвиль. На рис. 2(а) наведена температурна залежність діелектричної проникності піроелектрику – титанату барію [8]. В монокристалах та в кераміці сильно виражена діелектрична дисперсія виникає лише нижче точки Кюрі. У піроелектричній фазі (вище точки Кюрі) діелектрична проникність зменшується з частотою, і, відповідно, зростання її втрат починається лише на частоті близько 75 ГГц.

Даний тип дисперсії піроелектриків (рис. 2) на прикладі титанату барію, типовий для всіх сегнетоелектриків киснево-октаедричного типу. За даними аналізу діелектричної дисперсії можна стверджувати, що процеси поляризації в піроелектриках не виявляють помітної інерційності

електромеханічних властивостей практично до міліметрових хвиль. Це зумовлено м'яким режимом коливань структури кристалічної решітки перовскіту, в якому електрично викликаний п'єзоелектричний ефект залишається великим і вільним від гістерезису.

Хоча піроелектрики практично не є термостабільними структурами, проте задля їх використання знаходяться комплексні рішення, зокрема, у плівок термостабільність може бути вищою.

Висока діелектрична проникність у широкому діапазоні температур релаксорних сегнетоелектриків сприяє їх застосування в електронних пристроях, наприклад, у мікро механізмах та мікродрайверах. Так величиною діелектричної проникності, що створюється актуатором релаксора характеризує контрольоване переміщення.

На рис. 3. представлена частотна дисперсія діелектричної проникності релаксора в широкому діапазоні частот, що дозволяє оцінити обмеження на продуктивність релаксорних сегнетоелектриків в різних електронних пристроях.

Саме електро механічний зв'язок різних полярних кластерів релаксорного сегнетоелектрика здійснює переважний вплив на їх діелектричну проникність, тобто є домінуючим [8].

Розкриємо фізичні механізми широкого температурного максимуму діелектричної проникності двох основних внесків релаксорних сегнетоелектриків.

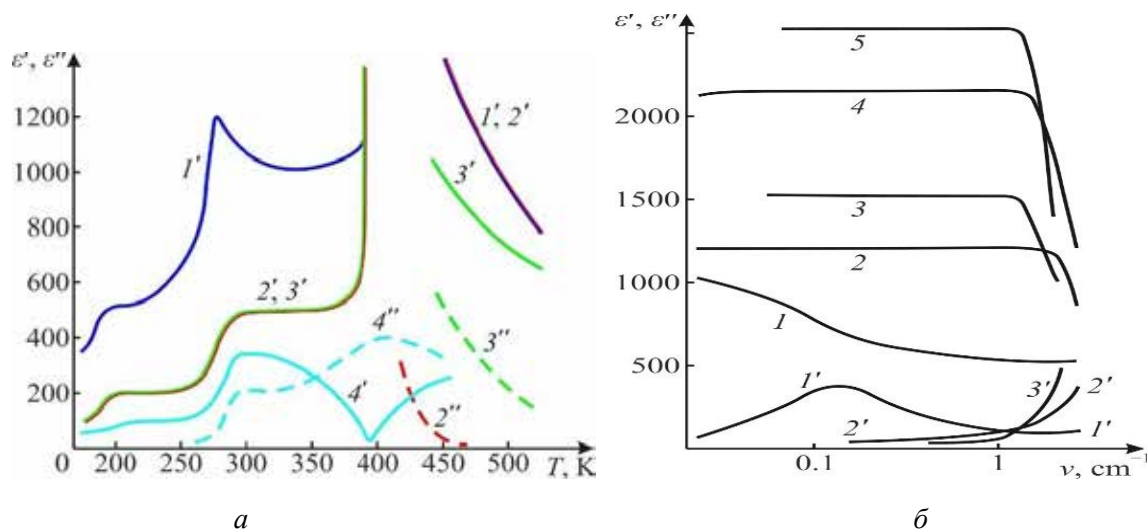


Рис. 2. Діелектрична дисперсія в сегнетоелектриках та піроелектриках: а – температурна залежність діелектричної проникності ϵ' та коефіцієнта втрат титанату барію ϵ'' на різних частотах: 1' – ϵ' на 1 МГц; 2', 2'' – ϵ', ϵ'' на 9,4 ГГц; 3', 3'' – ϵ', ϵ'' на 75 ГГц; 4', 4'' – ϵ', ϵ'' на 340 ГГц [8]; б – частотна залежність ϵ' (1-5) і ϵ'' (1'-5') при різних температурах: 1, 1' – полікристал при 22 °С, 2, 2' – полікристал при 200 °С, 3, 3' – монокристал при 200 °С, 4 – полікристал при 152 °С, 5 – монокристал при 155 °С [8]; частота вказана у зворотних довжинах хвиль: 1 cm^{-1} = 30 ГГц

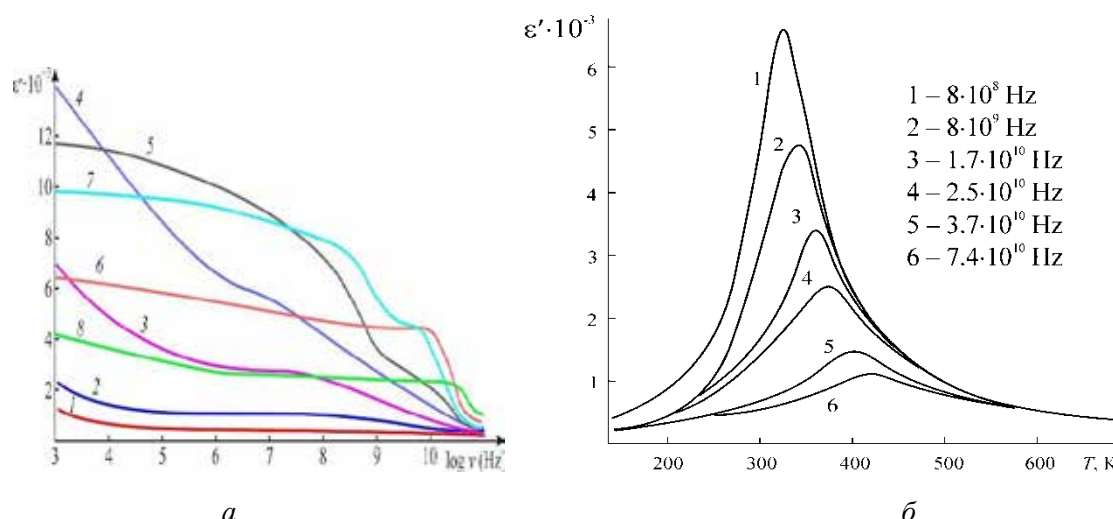


Рис. 3. Діелектричні спектри кристалів PMN: а – діелектрична проникність при температурах: 1 – 140 К, 2 – 200 К, 3 – 240 К, 4 – 270 К, 5 – 290 К, 6 – 300 К, 7 – 320 К, 8 – 360 К, 9 – 400 К, 10 – 500 К; б – залежність діелектричної проникності від температури на високих частотах [1, 8]

Низькочастотний ($1\text{--}10^5$ Гц) внесок у діелектричну проникність (ϵ -максимум) пояснюється переорієнтацією дипольних моментів полярних мікрообластей. Саме сильний електро механічний зв'язок «м'якої поляризації» полярних областей перетворює електрострикцію на п'єзоелектричний ефект.

Високочастотний ($10^8\text{--}10^{10}$ Гц) внесок у діелектричну проникність пояснюють зміщенням меж у структурі полярних нанообластей, що нагадує мікрохвильову дисперсію діелектричної проникності в сегнетоелектриках (рис. 1). Остання пов'язана з багатодоменною структурою сегнетоелектрика, тоді як у випадку релаксорного сегнетоелектрика, діелектрична дисперсія пояснюється «замороженою піроелектрикою» в межах полярних нанообластей [8].

Релаксорні сегнетоелектрики мають перевагу для використання в актуаторних пристроях, так як їх «п'єзомодуль» в десятки разів перевищує безінерційні піроелектрики, не дивлячись та їх підвищену інерційність. Дійсно, діелектрична проникність в деяких релаксорах на основі PMN ($\epsilon \approx 40000$), штучний п'єзомодуль досягає $d = 2000$ рС/Н [6], що суттєво більше, ніж у кращій п'єзокераміки типу PZT, а електро механічний ефект у релаксорах практично вільний від гістерезису.

Найбільша деформація під дією електричного поля спостерігається в кристалах $\text{PbZn}_{1/3}\text{Nb}_{2/3}\text{O}_3\text{--}4,5\%\text{PbTiO}_3$ (PZN-4,5%PT) [2, 6].

Для таких кристалів електрично керована деформація в 10 разів перевищує даний параметр у кращій п'єзокераміки типу PZT, а найбільшою

перевагою релаксорних сегнетоелектриків є практично повна відсутність гістерезису, який іноді описують як властивість «гігантської» електрострикції [9, 10].

Отже діелектричними дисперсійними механізмами можна визначати швидкість відгуку в сегнетоелектричних пристроях за швидкістю звуку в самих релаксорах. Електро механічний внесок у діелектричну проникність за швидкістю звуку впливає на швидкість відгуку зазначених пристроїв і стає домінуючим фактором, що залежить від розміру такого релаксорного елементу [11].

Виникнення п'єзоелектричного резонансу та інших проявів п'єзоелектричної активності відбувається виключно під час дії керуючої напруги. Даний електрично індукований п'єзо ефект обумовлений інерційністю керування електроіндукованою деформацією. Остання, як показано, визначається дисперсією діелектричної проникності в піроелектриках або релаксорних сегнетоелектриках.

Використання електрокерованих п'єзоелектричних пристроїв забезпечує високу точність руху, а тому широко застосовується в електроніці, робототехніці, машинобудуванні та приладобудуванні.

Висновки. Електрично індукована п'єзоелектрика є максимальною в діелектриках, що мають високу діелектричну проникність, ефективність якої забезпечується малоінерційною квазіпружною поляризацією. Для оцінки максимальної ефективності різних п'єзоелектричних матеріалів використовується метод діелектричної спектроскопії. Даний метод дозволяє контролю-

вати вплив механізмів електричної поляризації на параметри прояву електромеханічних ефектів та їх інерційність.

Підтверджено, що поляризаційні механізми у п'єзокераміці обмежують швидкість електромеханічних процесів в СВЧ-діапазоні, а в п'єзокристалах – не обмежують взагалі.

Встановлено, що використання у якості електромеханічних пристроїв нелінійних сегнетоелектриків п'єзоелектричного типу є недоцільним, як через сильний гістерезис, так і через інерційність перемикавання доменів. Хоча дані електромеханічні пристрої і мають велику електромеханічну реакцію (відклик), інерційність перемикавання доменів

для об'ємних структур обмежена частотою в кілогерц, а для плівок – в кілька мегагерц.

Встановлений електромеханічний ефект у піроелектриках значно нижчий та менш керований, вони практично безінерційні та їх використання можливе у вузькому діапазоні температур. Релаксорні сегнетоелектрики забезпечують великий і практично безгістерезисний ефект. Зазначений ефект суттєво знижується на високих частотах – кілогерцових і особливо на мегагерцових, релаксорні сегнетоелектрики успішно використовуються в актуаторних пристроях для отримання та технічного застосування електрично індукованого п'єзоефекту.

Список літератури:

1. Bovtun, V., Veljko, S., Savinov, M., et. al. Broadband dielectric spectroscopy of PZN-8%PT Single Crystal. *Ferroelectrics*, 2005, 318, pp. 179-183. <https://doi.org/10.1080/00150190590966351>
2. Newnham R. E., Sundar V R Yimnirun J. Su j., Zhang Q. M. Electrostriction: Nonlinear electromechanical coupling in solid dielectrics. *Journal of Physical Chemistry B*, 1997, 101(48), pp. 10141-10150. <https://doi.org/10.1021/jp971522c>
3. Newnham, R.E. *Properties of Materials: Anisotropy, Symmetry, Structure* (Oxford, 2004; online edn, Oxford Academic, 12 Nov. 2020). <https://doi.org/10.1093/oso/9780198520757.001.0001>
4. Park, S.-E., Shrout, T. R. Ultrahigh strain and piezoelectric behavior in relaxor based ferroelectric single crystals. *Journal of Applied Physics*, 1997, 82(4), pp. 1804–1811. <https://doi.org/10.1063/1.365983>
5. Poplavko, Y.M., Yakymenko, Y.I. *Functional dielectrics for electronics. Fundamentals of conversion properties*. Woodhead Publishing, 2020. <https://doi.org/10.1016/C2018-0-092-8>
6. Li, F., Cabral, M. J., Xu, B., Dickey, E. C., LeBeau, J. M., Wang, J., Luo, J., Taylor, W., Bellaiche, L., Xu, Z., Chen, L.-Q., Shrout, T. R., Zhang, S. Giant piezoelectricity of Sm-doped $\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3$ - PbTiO_3 single crystals. *Science*, 2019, 364: 6437, pp. 264–268. <https://doi.org/10.1126/science.aaw2781>
7. Poplavko, Yuriy. (2024). Electrically induced and controlled piezoelectricity. *Materials Plus*, 2024, pp. 110-120. <https://doi.org/10.37256/mp.3120244800>
8. Poplavko, Y.M. The nature of large dielectric constant in relaxor ferroelectrics. *Ferroelectrics*, 2004, 298, pp. 253-259. <https://doi.org/10.1080/00150190490423642>
9. Poplavko Y, Yakimenko Y, Large parameters and giant effect in electronic materials. *Radioelectronics and Communications Systems*, 2020, 63(6), pp. 289–298. <https://doi.org/10.3103/S0735272720060023>
10. Jiacheng Yu, Pierre-Eymeric Janolin. Defining “giant” electrostriction. *Journal of Applied Physics*, 2022, 131(17): 170701. <https://doi.org/10.1063/5.0079510>
11. Kamba S., Kempa M., Bovtun V., Petzelt J., Brinkman K., Setter N. Soft and central mode in $\text{PbMg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3}\text{O}_3$ relaxor ferroelectric. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 2005, 17(25): 3965. <https://doi.org/10.1088/0953-8984/17/25/022>

Voronov S.O., Poplavko Yu.M. SOME ASPECTS OF ELECTRICALLY INDUCED PIEZOELECTRICITY

The article is devoted to certain aspects of electrically induced piezoelectricity. Linearized electrostriction, which occurs under the action of a strong electric field in a solid dielectric, is known as a quasilinear electromechanical effect, similar to piezoelectricity. This effect is observed in a displacement-type electric field and is proportional to the square of the dielectric permittivity. This article reveals some controversial issues regarding the dielectric permittivity and analyzes the physical mechanisms of the electromechanical effect in piezoelectrics, paraelectrics and relaxor ferroelectrics, taking into account the inertia of the electromechanical response. Electrically induced piezoelectricity is maximal in dielectrics with a high dielectric permittivity, the efficiency of which is ensured by low-inertia quasielastic polarization. The method of dielectric spectroscopy is used to estimate the maximal efficiency of various piezoelectric materials. This method allows to control the influence of the mechanisms of electric polarization on the parameters of the manifestation of electromechanical effects and their inertia. It has been confirmed that polarization mechanisms in piezoceramics limit the speed of electromechanical processes in the microwave range, and in piezoelectric crystals – practically do not limit.

It has been established that the use of nonlinear ferroelectrics of the piezoelectric type as electromechanical devices is impractical, both due to strong hysteresis and due to the inertia of domain switching. Although these electromechanical devices have a large electromechanical response (response), the inertia of domain switching for bulk structures is limited to a frequency in kilohertz, and for films – to several megahertz. The specified electromechanical effect in paraelectrics is much lower and less controllable, they are practically inertialess and their use is possible in a narrow temperature range. Relaxor ferroelectrics provide a large and practically hysteresis-free effect. This effect is significantly reduced at high frequencies – kilohertz and especially megahertz. Relaxor ferroelectrics are successfully used in actuator devices to obtain and technically apply the electrically induced piezoelectric effect.

Key words: piezoelectrics, paraelectrics, ferroelectrics, electric polarization, dielectric properties.