

ТЕМА № 8

АКТИВНІ ДІЕЛЕКТРИКИ

- 8.1. Класифікація активних діелектриків
- 8.2. Сегнетоелектрики
 - 8.2.1. Основні властивості
 - 8.2.2. Класифікація сегнетоелектриків
 - 8.2.3. Мікроскопічний механізм спонтанної поляризації
 - 8.2.4. Застосування сегнетоелектриків
- 8.3. П'єзоелектрики
- 8.4. Піроелектрики
- 8.5. Електрети
- 8.6. Рідкі кристали
- 8.7. Матеріали для твердотільних лазерів

8.1. Класифікація активних діелектриків

Активними називають діелектрики, властивостями яких можна управляти за допомогою зовнішніх енергетичних впливів і використовувати ці матеріали для створення функціональних елементів електроніки. Активні діелектрики дозволяють здійснити генерацію, підсилення, модуляцію електричних і оптичних сигналів, запам'ятовування або перетворення інформації. У міру нарощування складності електронної апаратури і переходу до функціональної електроніки роль і значення активних матеріалів при вирішенні найважливіших наукових і технічних задач безперервно зростають.

До активних діелектриків відносять сегнето-, п'єзо- і піроелектрики; електрети; матеріали квантової електроніки; рідкі кристали; електро-, магніто- і акустооптичні матеріали; діелектричні кристали із нелінійними оптичними властивостями і ін.

Властивостями активних діелектриків можуть володіти не тільки тверді, але також рідкі і навіть газоподібні речовини (наприклад, активне середовище газових лазерів). За хімічним складом це можуть бути органічні і неорганічні матеріали. За будовою і властивостями їх можна поділити на кристалічні і аморфні, полярні і неполярні діелектрики. Ряд матеріалів виявляє свою активність лише завдяки наявності в них спонтанної або стійкої залишкової поляризації. Однак поляризований початковий стан не є обов'язковою умовою прояву активності матеріалу при зовнішніх впливах. Строго класифікувати активні діелектрики досить важко. До того ж різкої межі між активними і пасивними діелектриками не існує. Один і той же матеріал в різних умовах його експлуатації може виконувати або пасивні функції ізолятора або конденсатора, або активні функції управляючого або перетворюючого елемента.

Залежно від технічного призначення суттєво різні і вимоги до матеріалів. Так, одна з головних вимог, що пред'являються до пасивних діелектриків, полягає в збереженні стабільності властивостей при зовнішніх впливах. В той же час вимоги до активного матеріалу цілком протилежні: чим сильніше змінюються його властивості при зовнішніх збуреннях, тим краще може виконувати активний елемент функції управління або перетворення інформації, що поступає.

В більшості випадків активні діелектрики класифікують по роду фізичних ефектів, які можна використовувати для управління властивостями матеріалів. Однак така класифікація, хоч і є цілком логічною і обґрунтованою, все ж таки не дозволяє чітко відокремити одну групу матеріалів від іншої. Це пов'язано з тим, що багато матеріалів прояв-

ляють високу чутливість по відношенню до декількох видів енергетичних впливів. Найбільшою універсальністю у цьому плані характеризуються сегнетоелектрики, які поєднують у собі властивості п'єзо- і піроелектриків, електрооптичних і нелінійно-оптичних матеріалів. Вони можуть виступати і як електрети. Разом з тим, сегнетоелектрики володіють рядом специфічних властивостей. Найважливішою з них є нелінійна зміна поляризованості при дії електричного поля. Ця обставина дозволяє виділити сегнетоелектрики в самостійну групу активних діелектриків. Те ж саме можна сказати і про рідкі кристали, специфікою яких є анізотропія властивостей і висока структурна рухливість молекул, що виявляється в багатьох оптичних ефектах, невластивих іншим речовинам.

Зі всього різноманіття активних діелектриків будемо розглядати лише ті, які знайшли найбільш широке практичне застосування.

8.2. Сегнетоелектрики

8.2.1. Основні властивості

Сегнетоелектриками називають речовини, що володіють спонтанною поляризацією, напрям якої може бути змінений за допомогою зовнішнього електричного поля.

При відсутності зовнішнього електричного поля сегнетоелектрики, як правило, мають доменну структуру. Доменні – це макроскопічні області, що володіють спонтанною (мимовільною) поляризацією, яка виникає під впливом внутрішніх процесів в діелектрику. Напрями електричних моментів у різних доменів різні. Тому сумарна поляризованість зразка загалом може бути рівна нулю. В принципі, якщо кристал має малі розміри, то він може складатися всього лише з одного домена. Проте великі зразки завжди розбиваються на безліч доменів, оскільки одnodоменний стан енергетично не вигідний. Розбиття на домени зменшує електростатичну енергію сегнетоелектрика.

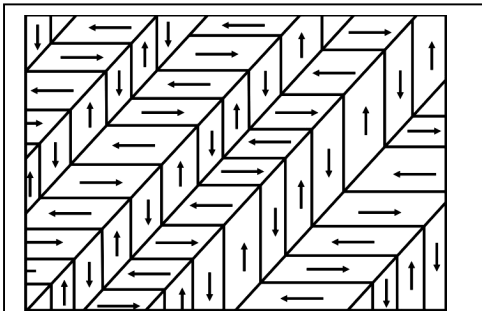


Рис. 3.15. Схема розташування доменів у кристалі титанату барію тетрагональної модифікації

У монокристалі відносна орієнтації електричних моментів доменів визначається симетрією кристалічної ґратки. Наприклад, в тет-

рагональній модифікації титанату барію (BaTiO_3) можливі шість напрямів спонтанної поляризованості: антипаралельних або перпендикулярних один одному. Відповідно для цього випадку розрізняють 180-градусні і 90-градусні доменні границі. Типова доменна структура для сегнетоелектриків такого типу показана на рис. 3.15. Енергетично найбільш вигідною є така структура, при якій забезпечується електрична нейтральність доменних границь, тобто проекція вектора поляризації на границю з боку одного домена повинна бути рівна по довжині і протилежна по напрямку проекції вектора поляризації з боку сусіднього домена. З цієї причини електричні моменти доменів орієнтуються за принципом «голова до хвоста». Встановлено, що лінійні розміри доменів складають від 10^{-4} до 10^{-1} см.

Зовнішнє електричне поле змінює напрями електричних моментів доменів, що створює ефект дуже сильної поляризації. Цим пояснюються властиві сегнетоелектрикам надвисокі значенні діелектричної проникності (до сотень тисяч). Доменна поляризація пов'язана з процесами зародження і росту нових доменів за рахунок зміщення доменних границь, які у результаті спричиняють переорієнтацію вектора спонтанної поляризованості у напрямі зовнішнього електричного поля.

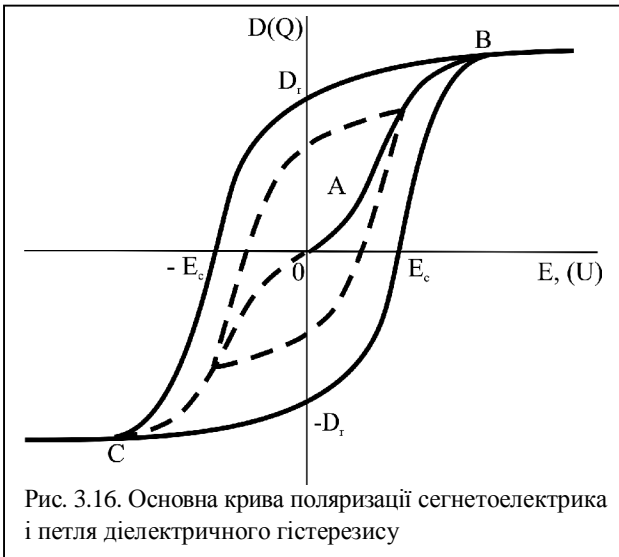


Рис. 3.16. Основна крива поляризації сегнетоелектрика і петля діелектричного гістерезису

Наслідком доменної будови сегнетоелектриків є нелінійна залежність їх електричної індукції від напруженості електричного поля, яка показана на рис. 3.16. При дії слабого електричного поля зв'язок між D і E носить приблизно лінійний характер (ділянка OA). На цій

ділянці переважають процеси оборотного зміщення (флуктуації) доменних границь. В області сильніших полів (область А В) зміщення доменних границь носить незворотний характер. При цьому розростаються домени з переважаючою орієнтацією, в яких вектор спонтанної поляризації утворює найменший кут із напрямом поля. При деякій напруженості поля, що відповідає точці В, всі домени виявляються орієнтованими в напрямку поля. Наступає стан технічного насичення. У монокристалах стан технічного насичення відповідає однодоменному стану. Деяке зростання індукції в сегнетоелектрику на ділянці технічного насичення обумовлене процесами індукованої поляризації. Її роль посилюється із підвищенням температури. Криву ОАВ називають основною кривою поляризації сегнетоелектрика (крива заряду сегнетоелектричного конденсатора).

Якщо в поляризованому до насичення зразку зменшити напруженість поля до нуля, то індукція не буде дорівнювати нулю, а прийме деяке залишкове значення D_r . При дії поля протилежної полярності індукція швидко зменшується і при деякій напруженості поля змінює свій напрям. Подальше збільшення напруженості поля знову переводить зразок в стан технічного насичення (точка С). Звідси випливає, що переполіаризація сегнетоелектрика в змінних полях супроводжується діелектричним гістерезисом. Напруженість поля E_c , при якій індукція проходить через нуль, називається коерцитивною силою.

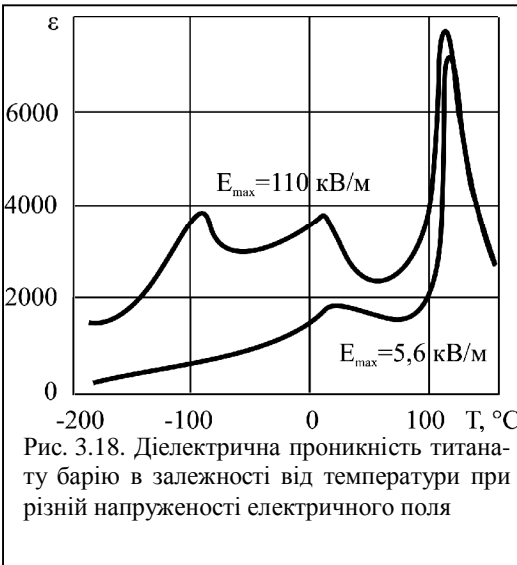
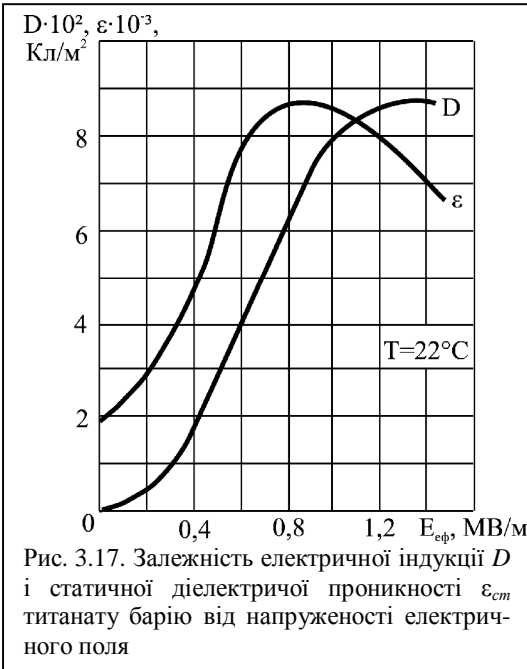
Діелектричний гістерезис обумовлений необоротним зміщенням доменних границь під дією поля і свідчить про додатковий механізм діелектричних втрат, пов'язаних з затратами енергії на орієнтацію доменів. Площа петлі гістерезису пропорційна енергії, що розсіюється в діелектрику за один період. Унаслідок втрат на гістерезис сегнетоелектрики характеризуються дуже великим тангенсом кута діелектричних втрат, який в типових випадках приймає значення близько 0,1.

Сукупність вершин петель гістерезису, отриманих при різних значеннях амплітуди змінного поля, утворює основну криву поляризації сегнетоелектрика (рис. 3.16).

Нелінійність поляризації по відношенню до поля і наявність гістерезису обумовлюють залежність діелектричної проникності і ємності сегнетоелектричного конденсатора від режиму роботи. Для характеристики властивостей матеріалу в різних умовах роботи нелінійного елемента використовують поняття статичної, реверсивної, ефективної та інших діелектричних проникностей.

Статична діелектрична проникність ϵ_{cm} визначається по основній кривій поляризації сегнетоелектрика:

$$\epsilon_{cm} = D/(\epsilon_0 E) = 1 + P/(\epsilon_0 E) \approx P/(\epsilon_0 E).$$



Реверсивна діелектрична проникність ϵ_p характеризує зміну поляризації сегнетоелектрика в змінному електричному полі при одночасній дії постійного поля.

Ефективну діелектричну проникність ϵ_{ef} , як і ефективну ємність конденсатора, визначають за діючим значенням струму I (несинусоїдального), що проходить в колі з нелінійним елементом при заданій напрузі U з кутовою частотою ω :

$$\epsilon_{ef} \approx C_{ef} = I/\omega U.$$

Діелектричну проникність, яку вимірюють в дуже слабких електричних полях, називають початковою.

На рис. 3.17 показана типова для сегнетоелектриків залежність статичної діелектричної проникності від напруженості поля.

Специфічні властивості сегнетоелектриків виявляються лише в певному діапазоні температур. В процесі нагрівання вище деякої температури відбувається роз-

пад доменної структури, і сегнетоелектрик переходить в параелектричний стан. Температура T_K такого фазового переходу отримала назву сегнетоелектричної точки Кюрі. У точці Кюрі спонтанна поляризованість зникає, а діелектрична проникність досягає свого максимального значення.

На рис. 3.18 наведена залежність ϵ титанату барію від температури. З рисунка видно, що при температурі порядку 120°C наявна ясно виражена точка Кюрі, нижче якої матеріал володіє сегнетоелектричними властивостями, хоча в ньому і спостерігаються додаткові структурні зміни (вторинні максимуми на кривих).

Перехід сегнетоелектрика в параелектричний стан супроводжується різким зменшенням $\text{tg}\delta$, оскільки зникають втрати на гістерезис.

8.2.2. Класифікація сегнетоелектриків

В даний час відомо декілька сотень сполук, що володіють властивостями сегнетоелектриків. Групу сегнетоелектричних матеріалів суттєво доповнюють і розширюють тверді розчини на основі різних сполук. Таким чином, сегнетоелектричність є широко поширеним явищем в діелектриках. При цьому сегнетоелектричні кристали характеризуються різноманіттям структурних типів, що свідчить про відмінність молекулярних механізмів виникнення спонтанної поляризації. Температура переходу в спонтанно поляризований стан (точка Кюрі) в різних сегнетоелектриків складає від декількох кельвінів (наприклад, у $\text{Pb}_2\text{Nb}_2\text{O}_7$ $T_K = 15$ K) до півтори тисячі кельвінів (наприклад, у LiNbO_3 $T_K = 1483$ K), а спонтанна поляризованість – від 10^{-3} до 3 Кл/м².

За типом хімічного зв'язку і фізичними властивостями всі сегнетоелектрики прийнято поділяти на дві групи: 1) йонні кристали; 2) дипольні кристали.

У сполуках першої групи характерним структурним елементом кристалічної решітки є кисневий октаедр, завдяки чому ці матеріали отримали назву сегнетоелектриків киснево-октаедричного типу. До йонних сегнетоелектриків відносяться титанат барію (BaTiO_3), титанат свинцю (PbTiO_3), ніобат калію (KNbO_3), ніобат літію (LiNbO_3), танталат літію (LiTaO_3), йодат калію (KIO_3), барій-натрієвий ніобат ($\text{Ba}_2\text{NaNb}_5\text{O}_{15}$), скорочено – БАНАН та ін.

У кристалах сегнетоелектриків другої групи наявні готові полярні групи атомів, здатні займати різні положення рівноваги. До дипольних сегнетоелектриків відносяться сегнетова сіль ($\text{NaKC}_4\text{H}_4\text{O}_6 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$), тригліцинсульфат ($(\text{NH}_2\text{CH}_2\text{COOH})_3 \cdot \text{H}_2\text{SO}_4$), дигідрофосфат калію (KH_2PO_4), нітрит натрію (NaNO_2) та ін. Саме у кристалах сегнетової солі вперше були виявлені особливості в поведінці

діелектриків, обумовлені спонтанною поляризацією. Звідси і походить назва всієї групи матеріалів із специфічними властивостями – сегнетоелектрики.

Йонні і дипольні сегнетоелектрики суттєво відрізняються за властивостями. Так, всі сполуки киснево-октаедричного типу нерозчинні у воді, володіють значною механічною міцністю, їх легко одержати у вигляді полікристалів за керамічною технологією. Навпаки, дипольні сегнетоелектрики володіють високою розчинністю у воді і малою механічною міцністю. Наприклад, розчинність сегнетової солі у воді настільки велика, що її кристали можна розпиляти за допомогою вологої нитки. Завдяки високій розчинності у воді можна легко виростити великі монокристали цих сполук з водних розчинів.

Переважає більшість сегнетоелектриків першої групи мають значно вищу температуру Кюрі і більше значення спонтанної поляризованості, ніж сегнетоелектрики другої групи. В значній частини дипольних сегнетоелектриків точка Кюрі лежить набагато нижче кімнатної температури.

8.2.3. Мікроскопічний механізм спонтанної поляризації

Для розуміння причин і природи спонтанної поляризації необхідне знання атомної структури і її змін при фазових переходах. Розглянемо як приклад виникнення спонтанної поляризації в титанаті барію (BaTiO_3), який по своїй науковій значущості і технічному застосуванню займає провідне місце серед сегнетоелектриків.

При температурі вище 120°C (точка Кюрі) титанат барію володіє кристалічною структурою типу перовскит, що показана на рис. 3.19, а. До складу елементарної комірки, що має форму куба, входить одна формульна одиниця типу ABO_3 . Основу структури складають кисневі октаедри, в центрі яких розташовані йони титану. У свою чергу йони кисню центрують грані кубу, складені з йонів барію.

Розміри елементарної комірки більші подвоєної суми йонних радіусів титану і кисню. Тому йон титану має деяку свободу переміщення в межах кисневого октаедра.

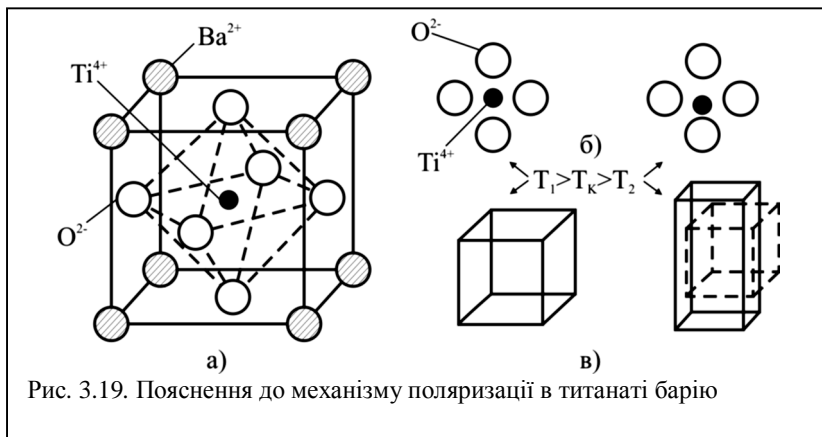
При високій температурі внаслідок інтенсивного теплового руху йон титану безперервно коливається від одного кисневого йону до іншого, так що усереднене в часі його положення співпадає з центром елементарної комірки. Завдяки центральній симетрії така комірка не володіє електричним моментом (рис. 3.19, б, ліворуч).

При температурі нижче $T_K = 120^\circ\text{C}$, як показує досвід, енергія теплового руху недостатня для перекидання йона титану із одного рівноважного положення в інше, і він локалізується поблизу одного з ки-

сневих йонів, що його оточують. В результаті порушується кубічна симетрія в розташуванні заряджених частинок, і елементарна комірка дістає електричний момент (рис. 3.19, б, справа). Одночасно з цим спотворюється форма комірки – вона витягується в напрямку осі, що проходить через центри йонів кисню і титану, що зближуються між собою, приймаючи тетрагональну симетрію.

Взаємодія між зарядженими частинками сусідніх комірок призводить до того, що зміщення йонів титану відбувається в них узгоджено, в одному напрямі, а це, у свою чергу, призводить до утворення доменів.

Розглянута схема утворення спонтанної поляризації BaTiO_3 носить якісний характер. Ретельні дослідження, виконані за допомогою дифракції нейтронів, показують, що насправді фазовий перехід в сег-



нетоелектричну фазу обумовлений зміщенням із симетричних положень не тільки йонів титану; істотний внесок в електричний момент кожної комірки вносить зміщення кисневих йонів.

При зародженні нової (сегнетоелектричної) фази зміщення йонів може відбуватися у напрямі будь-якого з ребер кубічної елементарної комірки. Тому в тетрагональній модифікації BaTiO_3 можливі шість напрямів спонтанної поляризованості. Подібного роду фазові переходи, спостережувані в йонних сегнетоелектриках, отримали назву переходів типу зміщення. Проте поява спонтанної поляризації може відбуватися не тільки при зміщенні йонів, але і за рахунок впорядкування в розташуванні дипольних груп, що займають в симетричній (параелектричній) фазі з рівною ймовірністю декілька різних положень рівноваги. Такий механізм утворення сегнетоелектричного стану характерніший для дипольних кристалів. Як типові приклади можна вказа-

ти кристали сегнетової солі, нітриту натрію, тригліцинусульфату, дигідрофосфату калію та ін. Фазові переходи, пов'язані із спонтанним впорядкуванням дипольних моментів, називають переходами типу «порядок – безпорядок».

У деяких кристалах електричні моменти сусідніх елементарних комірок за рахунок відповідного зміщення йонів або впорядкування дипольних моментів виявляються орієнтованими у взаємно протилежних напрямках. Такі речовини з антипаралельними електричними моментами називають антисегнетоелектриками. Вони також мають домену будову, проте спонтанна поляризація кожного домена рівна нулю. У парелектричній фазі (тобто вище за температуру Кюрі) антисегнетоелектрики можуть володіти високою діелектричною проникністю. Прикладами антисегнетоелектриків є цирконат свинцю (PbZrO_3), ніобат натрію (NaNbO_3), дигідрофосфат амонію ($\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$) та ін.

8.2.4. Застосування сегнетоелектриків

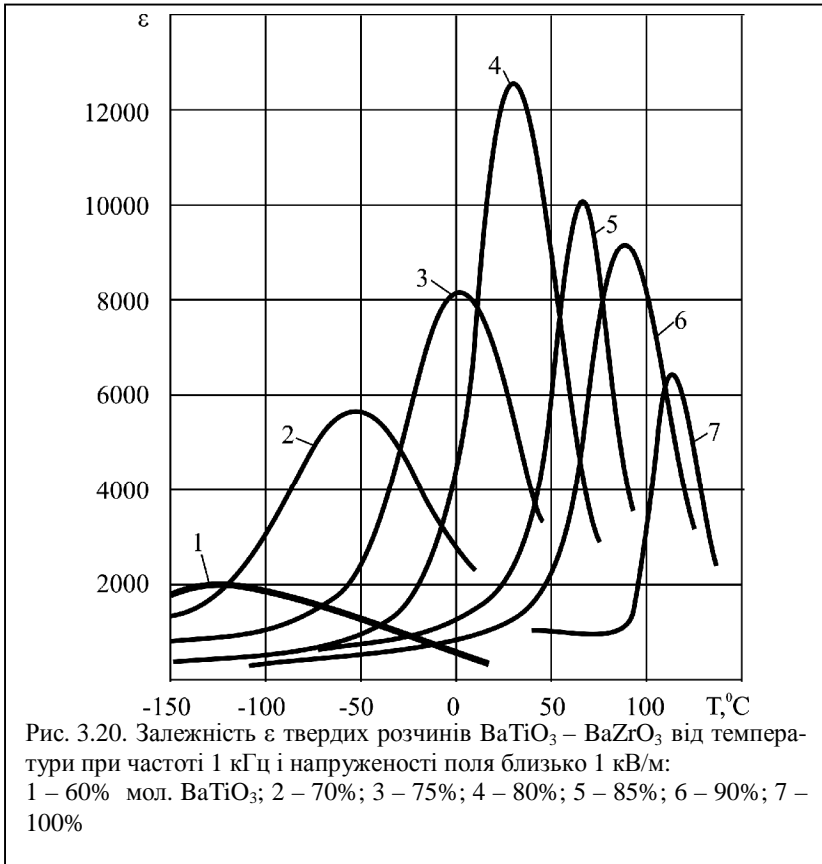
У технічному застосуванні сегнетоелектриків найважливішими напрямками слід вважати:

- 1) виготовлення малогабаритних низькочастотних конденсаторів із великою питомою ємністю;
- 2) використання матеріалів із великою нелінійністю поляризації для діелектричних підсилювачів, модуляторів і інших керованих пристроїв;
- 3) використання сегнетоелементів в електронно-обчислювальній техніці як елементи пам'яті;
- 4) використання кристалів сегнето- і антисегнетоелектриків для модуляції і перетворення лазерного випромінювання;
- 5) виготовлення п'єзоелектричних і піроелектричних перетворювачів.

Конденсаторна сегнетокераміка, як і будь-який діелектрик для виробництва звичайних конденсаторів, повинна мати найбільшу величину діелектричної проникності з малою залежністю від температури, незначні втрати, найменшу залежність ϵ і $\text{tg}\delta$ від напруженості електричного поля (малу нелінійність), високі значення питомого об'ємного і поверхневого опорів і високу електричну міцність.

Одним з найважливіших методів одержання оптимальних властивостей в заданому температурному інтервалі є використання твердих розчинів. Зміною концентрації компонентів в твердому розчині можна регулювати значення діелектричної проникності, змішувати температуру Кюрі (рис. 3.20), змінювати нелінійність поляризації і т.д. В твердих розчинах, в порівнянні з простими речовинами, можна

отримати більш згладжені температурні залежності ϵ , що має важливе значення для виробництва конденсаторів. Проте в більшості випадків



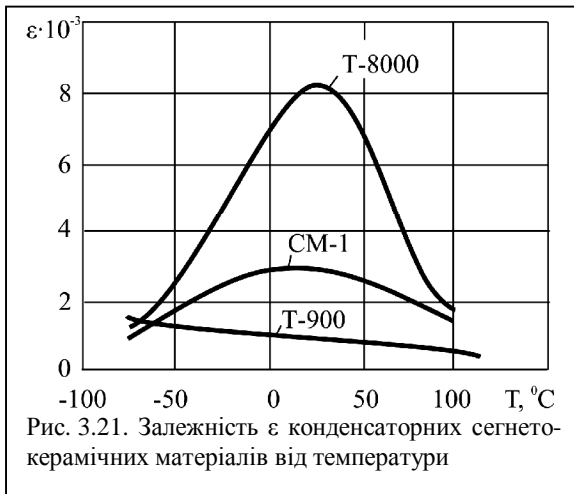
використання однофазних матеріалів, які навіть є твердими розчинами, не може забезпечити достатньо слабку температурну залежність ϵ . Для зменшення температурних залежностей параметрів конденсаторів до складу сегнетокераміки вводять різні домішки, які «розмивають» сегнетоелектричний фазовий перехід. В більшості випадків конденсаторні сегнетокерамічні матеріали містять декілька кристалічних фаз. При «розмитому» фазовому переході порівняно слабо виражені і нелінійні властивості діелектриків.

У промисловості використовують декілька сегнетокерамічних матеріалів, кожен з яких застосовують для певних типів конденсато-

рів, оскільки жоден матеріал не відповідає сукупності всіх перерахованих вимог.

Серед існуючої конденсаторної сегнетокераміки можна виділити:

- 1) матеріали із слабо вираженою температурною залежністю діелектричної проникності;
- 2) матеріали із згладженою залежністю діелектричної проникності від температури;
- 3) матеріали з максимальним значенням діелектричної проникності в певному інтервалі температур (рис. 3.21).



У матеріалі T-900 кристалічна фаза є твердим розчином титанатів стронцію (SrTiO_3) і вісмуту ($\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$). Максимум ϵ відповідає точці Кюрі $T_K = -140^\circ\text{C}$. Робочий діапазон температур розташований значно правіше T_K , тому температурна залежність злегка падаюча.

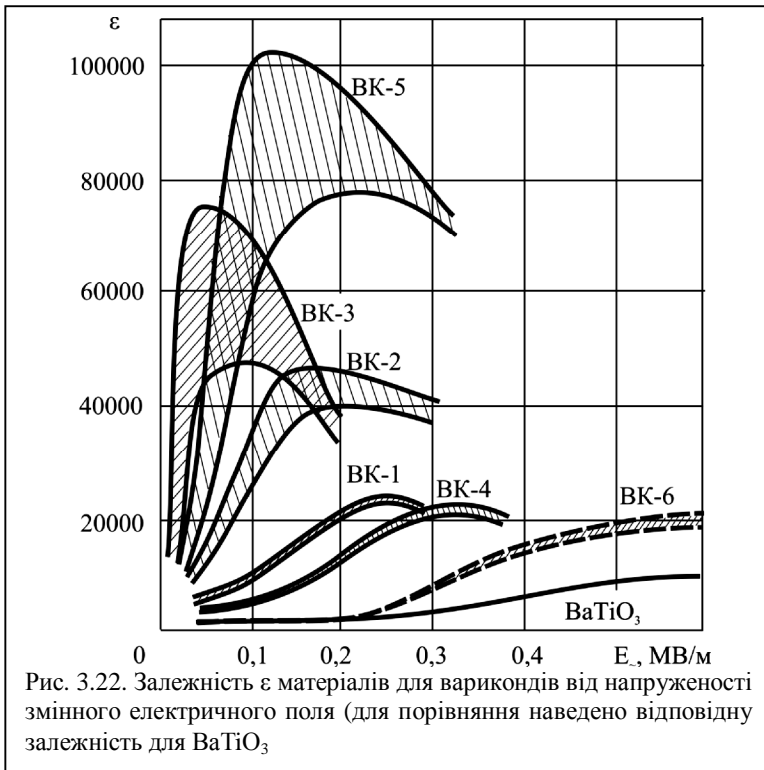
Матеріал CM-1 виготовляють на основі титанату барію з добавкою оксидів цирконію і вісмуту. Його застосовують для виробництва малогабаритних конденсаторів на низьку напругу.

Матеріал T-8000 має кристалічну фазу, що є твердим розчином $\text{BaTiO}_3\text{-BaZrO}_3$. Точка Кюрі цього матеріалу знаходиться в області кімнатної температури, тому поблизу неї діелектрична проникність має максимальне значення. Даний матеріал використовують для виготовлення конденсаторів, що працюють при кімнатній температурі (у неширокому інтервалі температур), у тому числі і високовольтних.

Поширені і інші сегнетокерамічні матеріали для конденсаторів, що відрізняються більшою діелектричною проникністю і більш згладженою залежністю її від температури.

Матеріали для варикондів мають різко виражені нелінійні властивості; застосовуються для виготовлення нелінійних конденса-

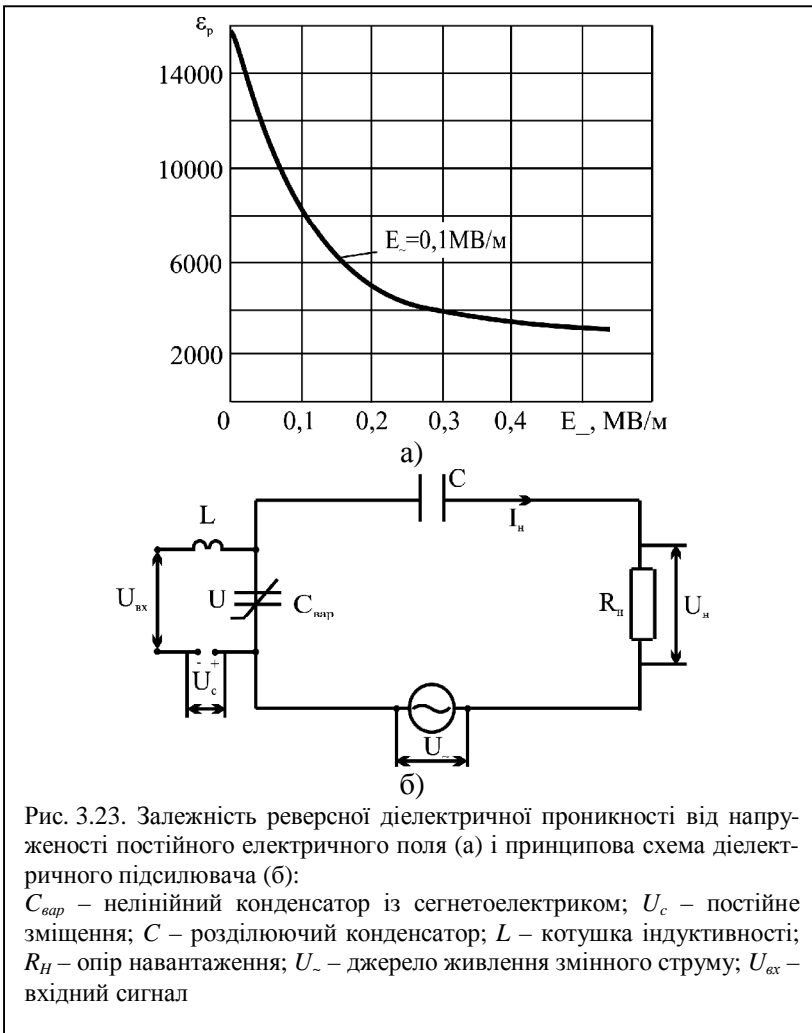
торів – варикондів.



Одна з основних характеристик варикондів – коефіцієнт нелінійності K , який визначається як відношення максимального значення діелектричної проникності (рис. 3.22) при деякій, максимальній для даного матеріалу, напруженості електричного поля до початкового значення діелектричної проникності. Чисельне значення коефіцієнта нелінійності для різних марок варикондів може змінюватися від 4 до 50 (у змінному полі). Основною кристалічною фазою в таких матеріалах є тверді розчини системи $\text{Ba}(\text{Ti},\text{Sn})\text{O}_3$ або $\text{Pb}(\text{Ti},\text{Zr},\text{Sn})\text{O}_3$.

Вариконди призначені для управління параметрами електричних кіл за рахунок зміни їх ємності при дії як постійної або змінної напруги так і декількох напруг, прикладених одночасно і що розрізняються по значенні і частоті. У найпростішому випадку їм доводиться працювати при одночасній дії змінного (синусоїдального) і постійного електричних полів, причому $E_- \gg E_+$. Як наголошувалося, зміна по-

ляризації сегнетоелектрика в цих умовах визначається реверсивною діелектричною проникністю ϵ_p . Вона характеризує ступінь орієнтованості електричних моментів доменів змінним полем за наявності переважної спрямованості їх дією постійного поля. Чим сильніше прикладене до сегнетоелектрика постійне поле, тобто чим більша спрямованість електричних моментів доменів, тим менший вплив на сумарну електричну індукцію в сегнетоелектрику чинить змінне поле. Отже, при заданій амплітуді змінного поля E_m реверсивна діелектрична проникність ϵ_p із зростанням E_- зменшується (рис. 3.23, а).



Нелінійні діелектричні елементи, зазвичай в тонкоплівковому виконанні, є основою різноманітних радіотехнічних пристроїв – параметричних підсилювачів, низькочастотних підсилювачів потужності, помножувачів частоти, модуляторів, стабілізаторів напруги, керованих фільтрів і ін.

Як приклад використання варикондів на рис. 3.23 наведено принципову схему діелектричного підсилювача, робота якого базується на зміні ємності нелінійного конденсатора $C_{вар}$ під впливом поля вхідного сигналу $U_{вх}$, що зумовлює зміну струму в навантаженні.

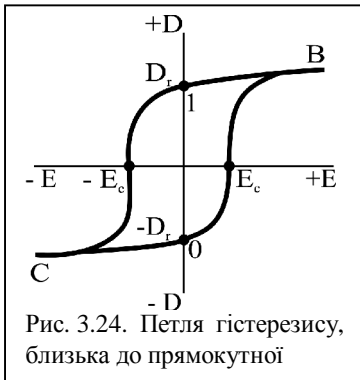


Рис. 3.24. Петля гістерезису, близька до прямокутної

Сегнетоелектрики з ППГ.

Завдяки діелектричному гістерезису сегнетоелектрики можна застосовувати в запам'ятовуючих пристроях ЕОМ. Для цих цілей необхідний матеріал з прямокутною петлею гістерезису (ППГ), що характерно для монокристалів (наприклад, тригліцинсульфат). При відсутності зовнішнього поля сегнетоелектрик з ППГ має два стійких стани, що відповідають різним напрямкам залишкової електричної індукції (рис. 3.24). Один з цих станів запам'ятовуючої комірки

означає зберігання одиниці, а інший – зберігання нуля. Подаючи зовнішню напругу різної полярності, сегнетоелектрик можна переводити з одного стану в інший. На цьому засновані запис, зчитування і стирання інформації. Зчитування інформації можна здійснити без її руйнування, наприклад, оптичним методом або зміною опору тонкої напівпровідникової плівки, нанесеної на поверхні сегнетоелектрика.

Час перемикання комірки пропорційний товщині кристала і при товщині в декілька десятих долей міліметра складає декілька мікросекунд. У сегнетокераміці процес переполаризації в окремих зернах відбувається незалежно, і час проростання доменів визначається розмірами зерен, які можна зменшити до декількох мікрометрів. В цьому випадку досягається вища швидкодія, ніж в монокристалах, хоча погіршується прямокутність петлі гістерезису.

Електрооптичні кристали. Кристали ряду сегнето- і антисегнетоелектриків володіють сильно вираженим електрооптичним ефектом, під яким розуміють зміну показника заломлення середовища, викликану зовнішнім статичним електричним полем. Якщо зміна показника заломлення пропорційна першому степеню напруженості, то еле-

ктрооптичний ефект називають лінійним (або ефектом Поккельса). Якщо ж спостерігається квадратична залежність від напруженості поля, то електрооптичний ефект називають квадратичним (або ефектом Керра).

Електрооптичні властивості сегнетоелектричних кристалів використовуються для модуляції лазерного випромінювання. Модуляція світлового потоку найпростіше здійснюється електричним полем, прикладеним до кристала, що знаходиться між двома схрещеними поляроїдами. Дія такого модулятора заснована на залежності площини поляризації світлового променя, що проходить через кристал, від напруженості електричного поля.

Різноманітні конструкції електрооптичних модуляторів світла створені на базі кристалів ніобату літію (LiNbO_3), дигідрофосфату калію (KN_2PO_4) і його аналогу дидейтерофосфату калію (KD_2PO_4).

У сегнетоелектриках електрооптичний ефект підсилюватися з наближенням до точки фазового переходу (точка Кюрі). Таким чином, є можливість отримання ефективної модуляції світла невеликою напругою, якщо підтримувати температуру кристала поблизу точки Кюрі.

Матеріали нелінійної оптики. При дії потужних світлових пучків, що створюються за допомогою лазерів, в багатьох сегнето- і антисегнетоелектриках виявляються нелінійні оптичні ефекти, в основі яких лежить нелінійна поляризації середовища, тобто залежність показника заломлення від напруженості поля самої світлової хвилі. Нелінійність оптичних властивостей сегнетоелектричних кристалів дозволяє здійснити генерацію гармонік лазерного випромінювання, зміщення і перетворення частот оптичних сигналів. Великий практичний інтерес представляє перетворення ІЧ-випромінювання лазерів (з $\lambda = 1,06$ мкм) у видиме світло. Високу ефективність такого перетворення забезпечують кристали KN_2PO_4 , LiNbO_3 , LiIO_3 (йодат літію), $\text{Ba}_2\text{NaNb}_5\text{O}_{15}$ та ін.