

Міністерство освіти і науки України  
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Електронної та біомедичної інженерії  
(повна назва)

Кафедра Мікроелектроніки, електронних приладів та пристроїв  
(повна назва)

## КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА Пояснювальна записка

рівень вищої освіти перший (бакалаврський)

Технологія багат шарових структур титанату барію та стронцію з градієнтом складу  
(тема)

Виконав: студент 4 курсу, групи МНТМН-21-1  
Куценко Ілля Юрійович  
(прізвище, ініціали)

Спеціальність 153 «Мікро та наносистемна техніка»  
(код і повна назва спеціальності)

Тип програми освітньо-професійна  
(освітньо-професійна або освітньо -наукова)

Освітня програма «Мікро та нанoeлектроніка»  
(повна назва освітньої програми)

Керівник старш. викл. Геннадій Бендеберя  
(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту

Зав. кафедри  
(підпис)

\_\_\_\_\_  
(прізвище, ініціали)

\*\*\*\*\*.

## Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Електронної та біомедичної інженеріїКафедра Мікроелектроніки, електронних приладів та пристроївРівень вищої освіти перший (бакалаврський)Спеціальність 153 «Мікро та наносистемна техніка»  
(код і повна назва)Тип програми освітньо-професійнаОсвітня програма «Мікро та наноелектроніка»  
(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри \_\_\_\_\_

(підпис)

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20 \_\_\_\_ р.

**ЗАВДАННЯ**  
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУстудентові Куценку Іллі Юрійовичу  
(прізвище, ім'я, по батькові)1. Тема роботи Технологія багатошарових структур титанату барію та стронцію з градієнтом складузатверджена наказом університету від 26 травня 2025 р. № 414Ст.2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії 16 червня 2025 р.

3. Вихідні дані до роботи 1. Властивості сегнетоелектричних матеріалів; 2. Методи отримання плівок сегнетоелектриків. 3. Градієнтні плівки BST

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі

1. Властивості сегнетоелектричних матеріалів;2. Методи отримання плівок сегнетоелектриків;3. Градієнтні плівки BST;

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (п.5 включається до завдання за рішенням випускової кафедри)

1. Презентація – 16 слайдів.

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Терміни виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз технічного завдання	27.05.25	
2	Властивості сегнетоелектричних матеріалів	29.05.25	
3	Методи отримання плівок сегнетоелектриків	02.06.25	
4	Гرادієнтні плівки BST	05.06.25	
5	Оформлення пояснювальної записки	11.06.25	
6	Рецензування, нормоконтроль	14.06.25	
7	Захист роботи	16.06.25	

Дата видачі завдання 26 травня 2026 р.

Студент \_\_\_\_\_  
(підпис)

Керівник роботи \_\_\_\_\_ ст. викладач кафедри МЕЕПП Бендеберя  
(підпис) (посада, прізвище)

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до передатестаційної роботи: 39 сторінок, 20 рисунків, 1 таблицю, 7 посилань.

СЕГНЕТОЕЛЕКТРИКИ, ДІЕЛЕКТРИЧНА ПРОНИКНІСТЬ, ТЕМПЕРАТУРНА СТАБІЛЬНІСТЬ, ТОНКІ ПЛІВКИ, МЕТОДИ ОСАДЖЕННЯ, НВЧ-ПРИСТРОЇ, ГРАДІЄНТНА СТРУКТУРА

Об'єкт дослідження – багатошарові структури титанату барію та стронцію

Мета роботи – розробка та розбір технологій багатошарових структур титанату барію та стронцію з градієнтом складу

Метод – теоретичний і експериментальний.

Актуальність: Сегнетоелектрики представляють собою активні діелектрики, що відіграють ключову роль у сучасному матеріалознавстві та електроніці завдяки своїм унікальним властивостям. Їхня нелінійна залежність поляризації від електричного поля, наявність спонтанної поляризації та доменної структури нижче температури Кюрі, а також високі значення діелектричної проникності роблять їх незамінними для широкого спектру застосувань.

## ABSTRACT

Explanatory note to the pre-test work: 39 pages, 20 figures, 1 table, 7 references.

FERROELECTRICS, DIELECTRIC PERMITTANCE, TEMPERATURE STABILITY, THIN FILMS, DEPOSITION METHODS, MICROWAVE DEVICES, GRADIENT STRUCTURE

Object of research – multilayer structures of barium and strontium titanate

Purpose of the work – development and analysis of technologies for multilayer structures of barium and strontium titanate with a composition gradient

Method: theoretical and experimental.

Relevance: Ferroelectrics are active dielectrics that play a key role in modern materials science and electronics due to their unique properties. Their nonlinear dependence of polarization on the electric field, the presence of spontaneous polarization and domain structure below the Curie temperature, as well as high dielectric constants make them indispensable for a wide range of applications.

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
1 ВЛАСТИВОСТІ СЕГНЕТОЕЛЕКТРИЧНИХ МАТЕРІАЛІВ.....	9
1.1 Явище сегнетоелектричності.....	9
1.2 Основні властивості сегнетоелектриків.....	10
1.3 Структура сегнетоелектричних матеріалів.....	15
1.4 Області застосування.....	18
2 МЕТОДИ ОТРИМАННЯ ПЛІВОК СЕГНЕТОЕЛЕКТРИКІВ.....	20
2.1 Осадження плівок розпиленням мішеней.....	20
2.2 Хімічне осадження з парової фази.....	21
2.3 Імпульсне лазерне осадження.....	22
3 ГРАДІЄНТНІ ПЛІВКИ BST.....	24
ВИСНОВКИ.....	37
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ.....	39
ДОДАТОК А.....	40

## ВСТУП

Стійкий інтерес до сегнетоелектричних (СЕ) матеріалів визначається можливістю створення на їх основі електрично керованих надвисокочастотних (НВЧ) пристроїв. Найперспективнішими сегнетоелектричними матеріалами для НВЧ застосувань є твердий розчин титанату барію і стронцію  $Ba_xSr_{1-x}TiO_3$  (BST), електрофізичні властивості якого змінюються в широких межах. До теперішнього часу на основі тонких плівок BST створено керовані СЕ конденсатори з високою добротністю і фазообертачі для частот аж до 60 ГГц. Однак, основним фактором, що обмежує використання сегнетоелектриків у техніці НВЧ, є значно сильніша залежність властивостей сегнетоелектричного матеріалу від температури порівняно з напівпровідниками та феритами. Таким чином, актуальною проблемою є мінімізація температурного впливу на основні параметри ємнісних СЕ структур, а саме:

- температурний коефіцієнт ємності (ТКЄ),
- діелектричні втрати,
- керованості (відношення ємностей при нульовій і максимальній прикладеній керуючій напрузі) тобто:

$$n = C(0)/C(U_{\max}) .$$

Одним із перспективних методів підвищення температурної стабільності СЕ елементів є застосування градієнтних структур на основі плівок різного компонентного складу. Такі плівки можна розглядати як багат шарову композитну структуру з різними температурами фазового переходу в шарах. Слід зазначити, що незалежно від технологічного методу одержання плівок, для формування градієнтних структур застосовується послідовне осадження шарів з декількох джерел (розпилення мішеней різного компонентного складу, використання різних сумішей прекурсорів при плазмохімічному осадженні).

Зміна джерел, навіть в одному технологічному циклі, призводить до короткочасного переривання процесу осадження і, як наслідок, до утворення дефектного перехідного шару між шарами, які осідають. Тому досліджується можливість створення градієнтних плівок BST методом іонно-плазмового осадження шляхом керування потоками компонентів плівки, що зростає. У результаті, використовуючи одне джерело матеріалу певного складу, осаджуються плівки SE із властивостями, що змінюються за товщиною: компонентним складом і параметрами кристалічної решітки. Таке рішення дає змогу узгодити кристалічні решітки SE плівок і підкладок із різних матеріалів, мінімізувати товщину дефектних шарів на кордонах розділу. Це дає можливість керувати такими електрофізичними характеристиками сегнетоелектричних структур, як:

- нелінійність,
- частотні втрати,
- швидкодія,
- температурні залежності властивостей.

Механізми зародження і формування шарів під час осадження з газової фази здебільшого визначаються такими технологічними параметрами, як тиск робочого газу, парціальний тиск хімічно активних газів, температура конденсації і швидкість нарощування шару.

Своєю чергою, температура і швидкість осадження визначають ступінь пересиченості парів, а зниження робочого тиску збільшує енергію атомів у момент їхнього осадження. Ці фактори визначають фазовий і компонентний склад, розміри кристалітів, морфологію поверхні плівки і якість перехідних шарів.

Тому дослідження залежності структури, компонентного складу, електричних і частотних характеристик плівок сегнетоелектриків, і BST зокрема, від технологічних умов осадження для розвитку технології сучасних мікроелектронних структур є актуальним завданням.



# 1 ВЛАСТИВОСТІ СЕГНЕТОЕЛЕКТРИЧНИХ МАТЕРІАЛІВ

## 1.1 Явище сегнетоелектричності

Сегнетоелектрики належать до так званих активних діелектриків. Вони вирізняються нелінійною залежністю поляризації від напруженості зовнішнього електричного поля, що пояснюється наявністю в сегнетоелектриках електричних доменів - ділянок спонтанної поляризації з характерними розмірами від  $10^{-1}$ - $10^{-3}$  мм, які є аналогічними магнітним доменам у феромагнетиках. Низка матеріалів має як сегнетоелектричні властивості, так і антисегнетоелектричні. Антисегнетоелектрикам властива спонтанна поляризація у двох і більше підрешітках їхньої структури, таким чином, що електричні моменти всередині кожного домену компенсуються, тому результуюча спонтанна поляризація дорівнює нулю. Проте антисегнетоелектричні матеріали відрізняються від лінійних діелектриків, оскільки мають доменну структуру і володіють спонтанною поляризацією. Усі сегнетоелектрики й антисегнетоелектрики можна розділити на дві групи:

- киснево-октаедричні або близькі до них, у яких усередині кисневого октаедра перебуває сегнетоактивний іон;
- водневі або близькі до них, у яких сегнетоелектричні властивості виникають внаслідок переміщення протонів у водневих зв'язках.

Таким чином, особливостями сегнетоелектриків є:

- нелінійна залежність поляризації від зовнішнього електричного поля;
- спонтанна поляризація нижче температури Кюрі ( $T_K$ );
- наявність доменної структури нижче  $T_K$ ;
- високі значення діелектричної проникності.

## 1.2 Основні властивості сегнетоелектриків

Сегнетоелектричний полікристал складається з доменів, фрагментів з однорідною спонтанною поляризацією. Доменна стінка є межею двох суміжних доменів. Без зовнішнього електричного поля домени орієнтовані довільно, що призводить до майже повної компенсації загальної поляризації. При накладенні зовнішнього електричного поля домени орієнтуються вздовж поля, викликаючи загальну поляризацію зразка матеріалу. Зміна орієнтації домена відбувається за рахунок руху доменних стінок.

Найхарактернішою особливістю сегнетоелектричного матеріалу є оборотність постійної поляризації, що призводить до появи петлі гістерезису, яка є аналогічною до кривої намагнічування у ферромагнітних матеріалах і має вигляд, що залежить від поляризації  $P$ , від напруженості електричного поля  $E$ . Типовий вигляд петлі гістерезису  $P$ - $E$  представлено на рис. 1.1

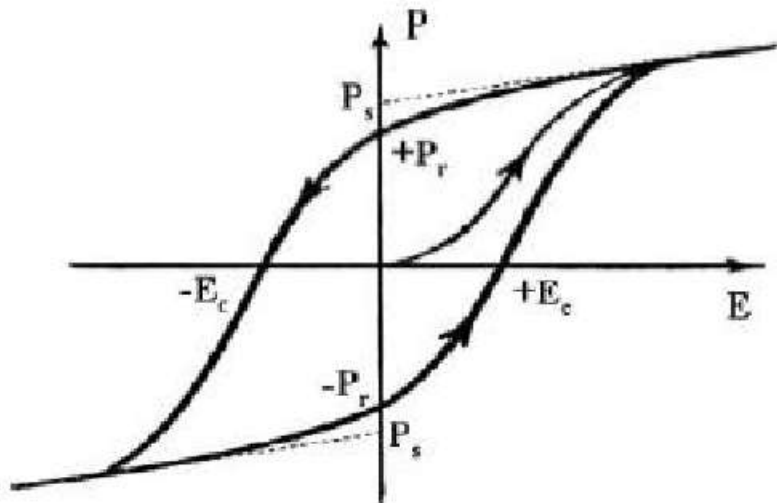


Рисунок 1.1 - Петля гістерезису сегнетоелектричного матеріалу

Петля гістерезису характеризується насиченістю поляризації  $P_s$ , залишковою поляризацією  $P_r$  і коерцитивним полем  $E_c$ .

Насиченість поляризації - це максимальна поляризація, що може бути досягнута, залишкова поляризація - значення поляризації за відсутності зовнішнього поля, а коерцетивне поле - величина прикладеного електричного поля, необхідне, щоб компенсувати поляризацію до нуля. Петля гістерезису P-E доменної структури сегнетоелектрика з'являється при температурі, нижчій за  $T_k$ , при зменшенні поля деполяризації.

За постійної температури зразка зв'язок між вектором електростатичної індукції  $D$  і напруженістю зовнішнього поля  $E$  для сегнетоелектриків нелінійний (рис. 1.2), тобто діелектрична проникність  $\epsilon$  є функцією напруженості поля  $E$ :

$$\underline{D} = \epsilon \epsilon_0 \underline{E} \quad (1.1)$$

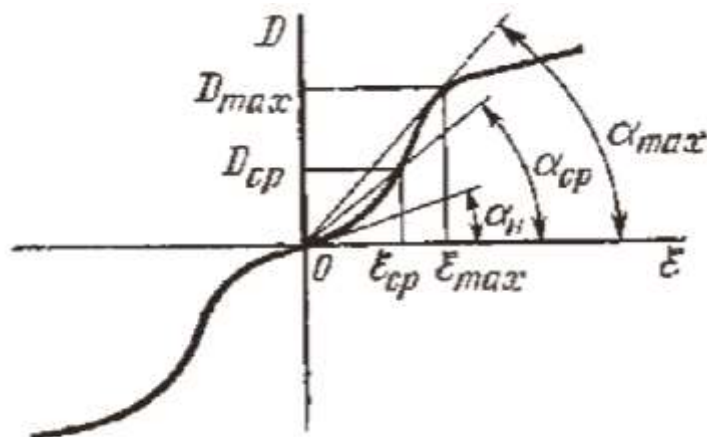


Рисунок 1.2 - Основна крива поляризації, що пояснює зв'язок між  $D$  і  $E$  у сегнетоелектриках

Згідно з рис.1.2  $\epsilon$  не є постійною величиною. З графіка можна визначити початкову  $\epsilon_n$ , деяку середню  $\epsilon_{cp}$  і максимальну  $\epsilon_{max}$  діелектричні проникності  $\epsilon_{max}$ :

$$\epsilon_n = \left( \frac{D}{\epsilon_0 E} \right)_{E \rightarrow 0}, \epsilon_{cp} = \frac{D_{cp}}{\epsilon_0 E_{cp}}, \epsilon_{max} = \frac{D_{max}}{\epsilon_0 E_{max}} \quad (1.2)$$

Основну криву поляризації (рис. 1.2) отримують при збільшенні  $E$  від нуля до заданого значення для попередньо деполяризованого зразка. Характерною особливістю сегнетоелектриків є велика величина діелектричної проникності в слабких полях. У сильних полях ( $E > E_{\max}$ ) спостерігається зменшення діелектричної проникності. Це пов'язано із завершенням процесу поляризації доменів.

На рис. 1.3 наведено залежності  $\epsilon = f(E)$  для титанату барію за різних температур. Очевидно, що при  $T = 22^\circ\text{C}$  спостерігається зростання  $\epsilon$ , а потім зниження. При  $T = 130^\circ\text{C}$  величина  $\epsilon$  не залежить від поля, оскільки руйнується доменна структура. Температура Кюрі для  $\text{BaTiO}_3$  становить  $120^\circ\text{C}$ . В інтервалі температур від  $0$  до  $120^\circ\text{C}$  кристалічна решітка  $\text{BaTiO}_3$  є тетрагональною, а при  $120^\circ\text{C}$  відбувається фазовий перехід до кубічної решітки, а домени руйнуються під впливом теплового руху. За  $0^\circ\text{C}$  у  $\text{BaTiO}_3$  відбувається другий фазовий перехід, і кристалічна ґратка з тетрагональної трансформується в ромбічну, а в інтервалі від  $70$  до  $90^\circ\text{C}$  - фазовий перехід перетворення ґратки на моноклінну або триклінну. Хоча вектори спонтанної поляризації змінюють свій напрямок, але ці фазові переходи не руйнують доменну структуру.

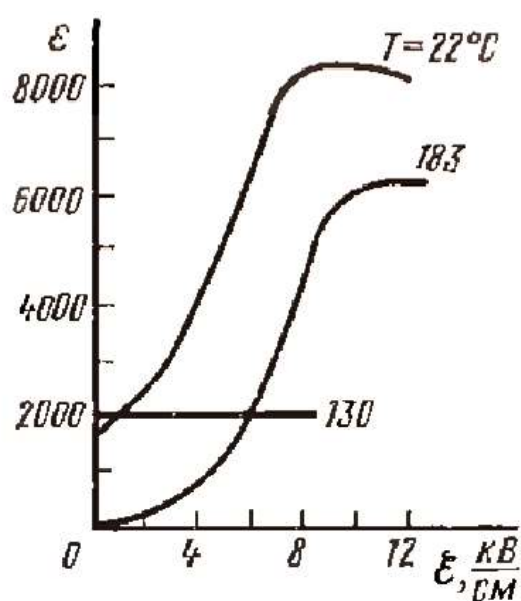


Рисунок 1.3 - Залежність  $\epsilon$  титанату барію від напруженості зовнішнього електричного поля за різних температур

Частотна залежність діелектричної проникності сегнетоелектриків аналогічна залежності  $\epsilon = \varphi(f)$  для феритів: зі зростанням частоти  $\epsilon$  зменшується і в деякій області може спостерігатися крутий спад. На рис. 1.4 наведено частотну залежність  $\epsilon = \varphi(f)$  для титанату барію за постійної температури. Слід зазначити, що абсолютні значення величини  $\epsilon$  залежать від технології виготовлення кристалів і від обраної методики вимірювань.

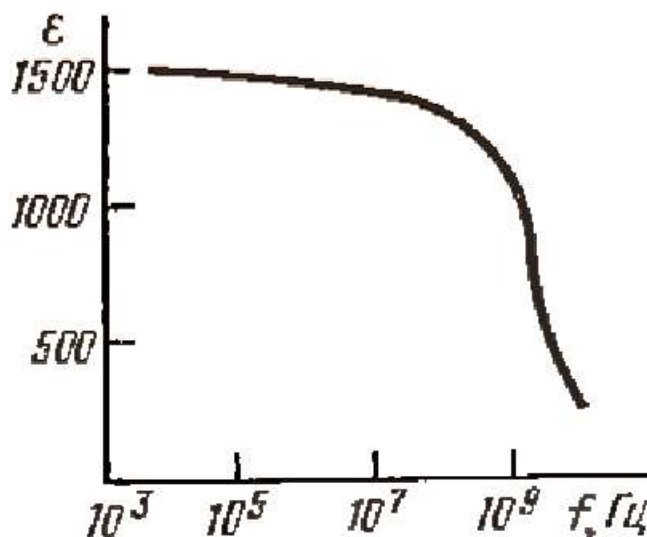


Рисунок 1.4 - Залежність  $\epsilon$  титанату барію від частоти

На рис. 1.5 (а) наведено криві  $\epsilon = f(T)$  для різних частот під час дослідження сегнетоелектрика  $\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3$ . На графіках до того ж спостерігається водночас ще одна особливість, а саме: розмитий фазовий перехід та деякі релаксаційні властивості, що виявляються у зсуві максимуму  $\epsilon$  у бік вищою температури та зменшенні його величини зі збільшенням частоти. У такому разі максимум  $\epsilon$  вже не можна вважати таким, що відповідає точці Кюрі. Подібні властивості мають також тверді розчини на основі  $\text{BaTiO}_3$  -  $\text{BaZrO}_3$  -  $\text{BaSnO}_3$ ,  $\text{SrTiO}_3$  -  $\text{Bi}_{2/3}\text{TiO}_3$ .

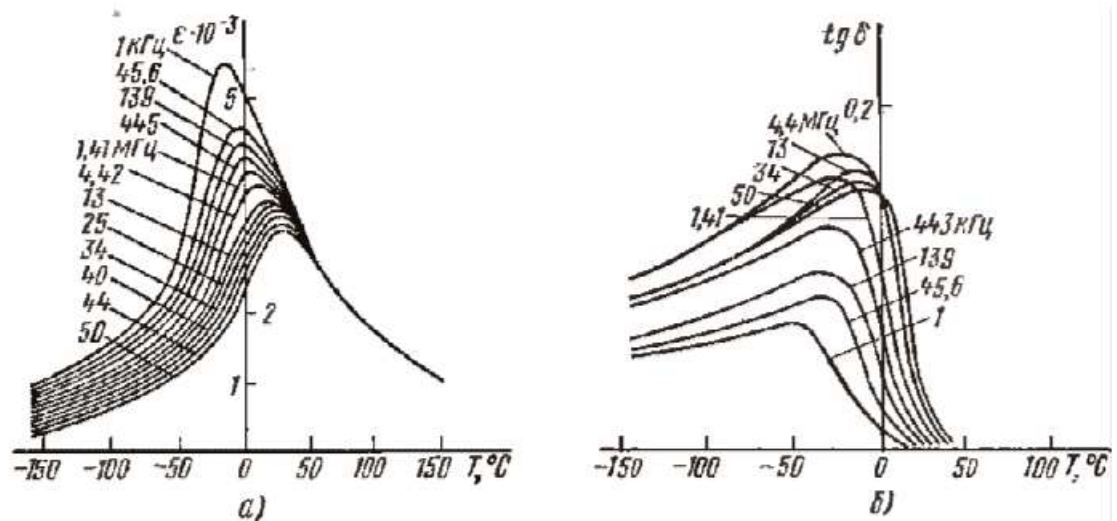


Рисунок 1.5 - Залежність діелектричної проникності (а) і тангенса кута діелектричних втрат (б) від температури на різних частотах

На рис. 1.5 (б) наведено криві  $\text{tg } \delta = f(T)$  для сегнетоелектрика  $\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3$ . Зазвичай у сегнетоелектриках при  $T < T_c$  спостерігається максимум  $\text{tg } \delta$ . Крім того, у сегнетоелектричній ділянці  $\text{tg } \delta$  вищий, ніж у параелектричній,  $\text{tg } \delta$  зазвичай у межах 0.01-0.06.

Ці втрати значною мірою визначаються втратами на гістерезис, які пропорційні площі петлі гістерезису. При підвищенні температури спостерігається зменшення діелектричних втрат за рахунок електропровідності сегнетоелектрика.

### 1.3 Структура сегнетоелектричних матеріалів

Титанат барію стронцію  $\text{Ba}_x\text{Sr}_{1-x}\text{TiO}_3$  (BST) є твердим розчином  $\text{BaTiO}_3$  та  $\text{SrTiO}_3$ .  $\text{BaTiO}_3$  має тетрагональну кристалічну ґратку та властивості сегнетоелектрика, в той час як  $\text{SrTiO}_3$  - кубічну ґратку та параелектричні властивості при кімнатній температурі (рис. 1.66 та рис. 1.7). Додаток Ba до Sr

призводить до зниження  $T_k$  (рис. 1.7) і збільшення  $\epsilon$  матеріалу. На рис. 1.8 показано фазову діаграму в усьому діапазоні концентрацій компонент. Критична концентрація  $x_c \approx 0.094$  розділяє фазову діаграму на дві області. Структура низькотемпературної сполуки  $Ba_xSr_{1-x}TiO_3$  з  $x < x_c$  є тетрагональною. Сполуки з  $x > x_c$  зі зниженням температури проходять послідовність трьох сегнетоелектричних фаз: тетрагональної ( $P4mm$ ), ромбічної ( $Amm2$ ), і ромбоєдричної ( $R3m$ ).

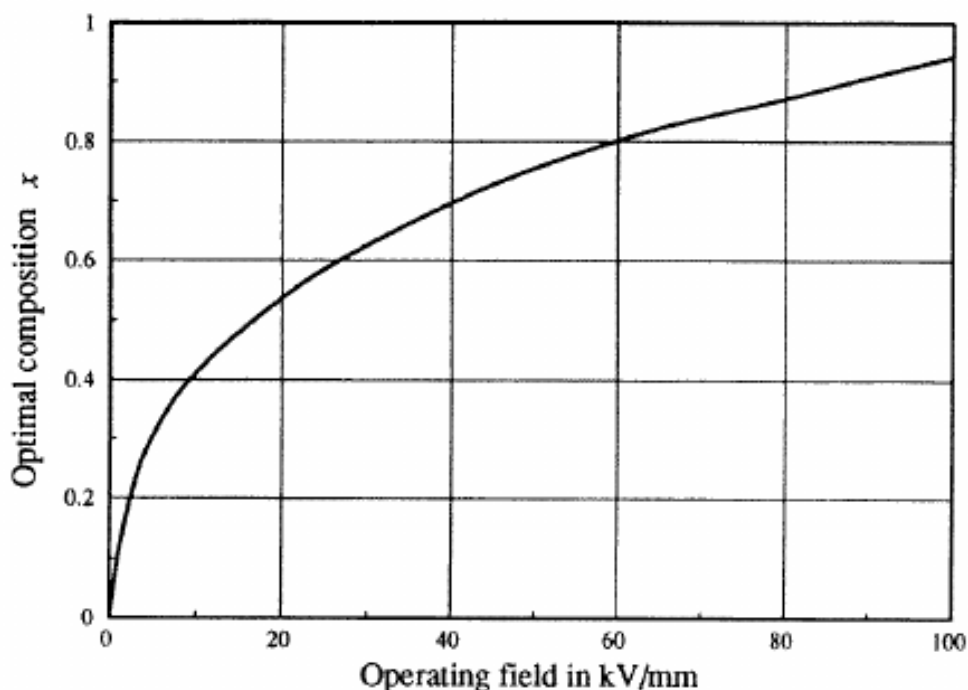


Рисунок 1.6 - Параметр кристалічної решітки  $Ba_{1-x}Sr_xTiO_3$  залежно від складу

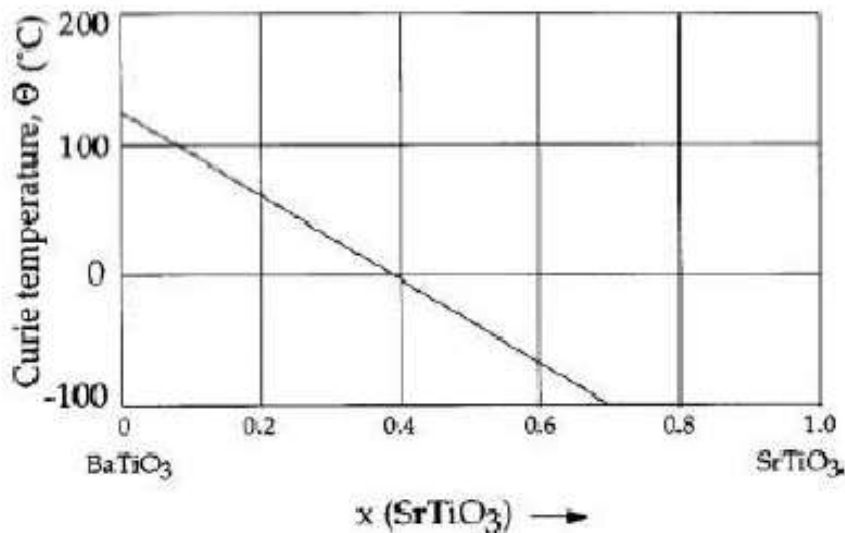


Рисунок 1.7 - Залежність температури Кюрі від складу  $Ba_{1-x}Sr_xTiO_3$

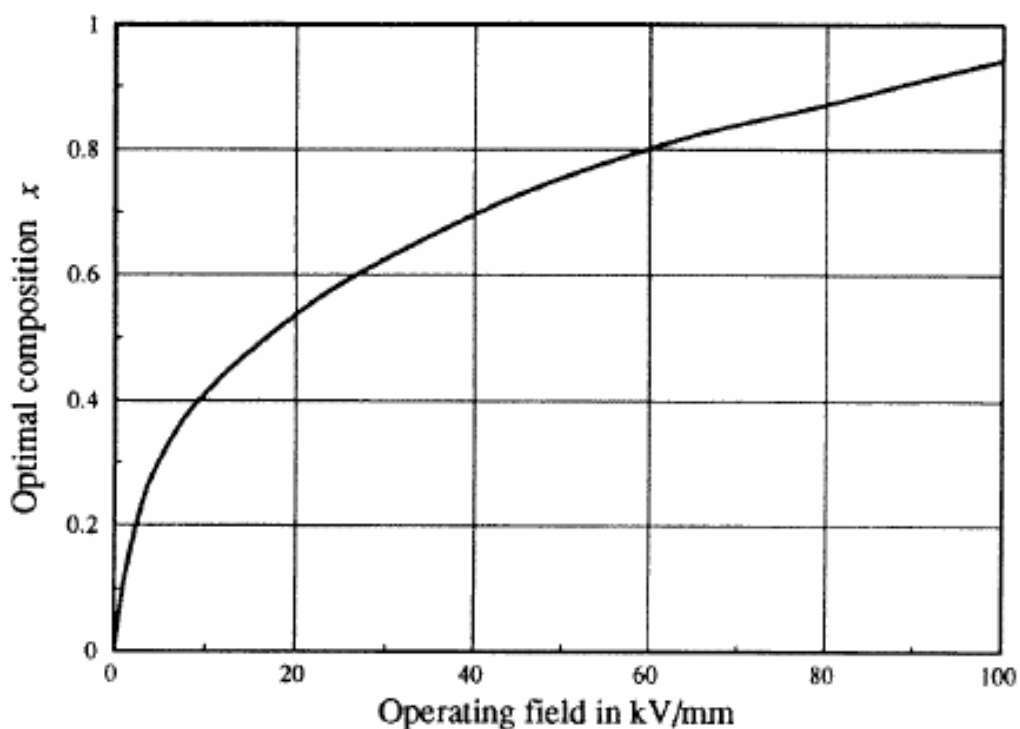


Рисунок 1.8 - Фазова діаграма критичної температури від концентрації  $Ba_{1-x}Sr_xTiO_3$ : тетрагональна (P4mm); ромбічна (Am2); ромбодрічна (R3m)

Винятково високі значення діелектричної проникності були зареєстровані для об'ємних зразків BST кераміки (2500) та епітаксціальних плівок (2000 - 6000). Висока діелектрична проникність сегнетоелектрика BST пояснюється



зміщенням іонів під час застосування електричного поля. Це відрізняє його від  $\text{SiO}_2$  з істотно низькою діелектричною проникністю, в якому тільки деформується електронна хмара.

Важливою властивістю BST є також можливість керування діелектричною проникністю і тангенсом кута діелектричних втрат поблизу сегнетоелектричної температури Кюрі прикладеним зовнішнім полем. Це дає можливість використовувати цей матеріал в електрично перебудовуваних НВЧ пристроях, таких як резонатори, фільтри і фазообертачі .

#### 1.4 Области застосування

Сегнетоелектричні матеріали володіють не тільки сегнетоелектричними властивостями, вони також проявляють піроелектричні та п'єзоелектричні властивості. Піроелектрики використовуються у формувачах зображення і детекторах випромінювання. Властивості п'єзоелектриків знаходять застосування в різних електромеханічних пристроях, наприклад, у мікроелектромеханічних системах (МЕМС) . Завдяки високим значенням діелектричної проникності в перовскітних складних оксидів, на їхній основі можна створити енергонезалежну пам'ять високої ємності . Широкі можливості застосування відкриваються для сегнетоелектричних плівок у НВЧ-техніці. Особливий інтерес представляють нанорозмірні сегнетоелектрики: ультратонкі плівки і наночастинки. До кінця 20-го століття вважалося, що сегнетоелектричні властивості зникають за розмірів, нижчих за критичний (приблизно 10 нм). Однак завдяки розвитку засобів вимірювання та методик дослідження з'ясувалося, що властивості сегнетоелектриків (наприклад, переключуваність поляризації) зберігаються в перовскітних структурах завтовшки в кілька нанометрів , а в отриманих із них наночастинках принаймні до 20 нм . Тому з'являються нові можливості у використанні нанорозмірних сегнетоелектриків.

Створення матриць сегнетоелектричних запам'ятовуючих наноконденсаторів з високою щільністю розміщення може бути основою для виробництва запам'ятовуючих пристроїв високої ємності. Нанотрубки з сегнетоелектричних матеріалів мають великий потенціал застосування в перспективних пристроях: від конденсаторів з великим відношенням довжина/діаметр для напівпровідникових динамічних запам'ятовувальних пристроїв до мікросистем подачі рідини в струменевих принтерах і установках для літографії. У галузі пристроїв функціональної мікроелектроніки перспективними матеріалами є тонкі сегнетоелектричні плівки титанату барію-стронцію. Цей напрям розвитку мікроелектроніки орієнтований на заміну електричних ланцюгів, що складаються з окремих елементів. Великий інтерес викликає застосування тонких плівок BST, вирощених на діелектричних підкладках для створення дискретних НВЧ-пристроїв, таких як фільтри, які електрично перебудовуються, і фазообертальні елементи антен з електронним скануванням. До переваг фазообертачів на основі сегнетоелектриків, порівняно з аналогічними пристроями на основі р-і-п діодів, є малий час перемикання (десятки нс), мала споживана потужність у колах керування (одиниці мВт), низькі фазові шуми, менша собівартість виробництва та можливість інтегрального виконання пристроїв. Найважливішою характеристикою використання резонансних елементів на основі тонких сегнетоелектричних плівок є їхня власна добротність, що не повинна суттєво зменшуватися за зміни діелектричної проникності, а за величиною не повинна бути нижчою за добротність тієї лінії передавання, з якою використовується. Наприклад, збільшення добротності мікросмужкових резонансних елементів, пов'язаних із варакторами, до значень, вищих за 100, дає змогу знизити втрати, які вносяться, сегнетоелектричного фазообертача до рівня 2дБ. Це дасть змогу скоротити наполовину кількість фазообертачів у фазованій антенній решітці. Таким чином, використання матеріалів і фізичних явищ дає змогу розширити можливості приладів і пристроїв. Удосконаленням конструкції самих пристроїв і якості застосовуваних у них нанорозмірних плівок можуть бути поліпшені їхні технічні характеристики. Сегнетоелектричні властивості

нанорозмірних тонких плівок істотно відрізняються від властивостей їхніх об'ємних сегнетоелектричних матеріалів. На властивості істотний вплив має структура наноматеріалу. Ця структура визначається кількома факторами:

- дефектами структури (дислокацій і вакансій):
- формуванням доменної структури;
- залишковими механічними напруженнями і пов'язаними з ними деформаціями.

Таким чином важливою є методика отримання тонких плівок сегнетоелектриків

## 2 МЕТОДИ ОТРИМАННЯ ПЛІВОК СЕГНЕТОЕЛЕКТРИКІВ

### 2.1 Осадження плівок розпиленням мішеней

Метод розпилення широко застосовується для осадження сегнетоелектричних тонких плівок. Він технологічно простий, використовує універсальне обладнання, забезпечує високу швидкість осадження, рівномірність розподілу товщини і складу плівки на великій площі та низьку концентрацію домішок. Як недоліки, слід зазначити складність контролю складу багатокомпонентних плівок, що містять леткі елементи, такі як свинець і вісмут. Щоб компенсувати втрати легколетких, зазвичай використовують мішені з їхнім надлишком або кілька мішеней. Залежно від електропровідності мішені, використовують або метод розпилення на постійному струмі, або метод високочастотного розпилення. Останній може застосовуватися для осадження сегнетоелектричних плівок. При використанні як джерела матеріалу діелектричної керамічної мішені застосовують ВЧ магнетронне розпилення. Нанесення плівки відбувається проводять в атмосфері суміші  $O_2$  і  $Ar$ .  $O_2$  виступає як хімічно активний газ, а  $Ar$  підвищує швидкість розпилення мішені.

Структура, сегнетоелектричні властивості, швидкість зростання товщини, фазовий склад і стехіометрія вирощених плівок залежать від параметрів процесу:

- температури підкладки,
- тиск і склад газової суміші,
- потужність розряду,
- відстань мішень - підкладка,
- склад мішені.

## 2.2 Хімічне осадження з парової фази

Метод CVD (Chemical Vapor Deposition) заснований на розкладанні газоподібних прекурсорів на нагрітій підкладці з утворенням плівки бажаної композиції. CVD є одним із найперспективніших методів у технології створення сегнетоелектричної пам'яті (FeRAM) через забезпечення:

- високої швидкості осадження,
- високої досконалості кристалічної структури плівки,
- високої конформності осадження на поверхні з розвиненим рельєфом,
- рівномірності складу плівки і товщини на великій площі покриття,
- сумісності з напівпровідниковими технологіями.

Крім того, випаровуванню легколетких елементів, таких як Pb і Bi, зі складу деяких сегнетоелектричних матеріалів ( $\text{PbZr}_x\text{Ti}_{1-x}\text{O}_3$  (PZT),  $\text{SrBi}_x\text{Ta}_{1-x}\text{O}_9$  (SBT)), можна запобігти за рахунок відносно високого тиску газу, за якого відбувається процес. Склад плівки легко регулюється зміною молярного співвідношення прекурсорів у камері росту.

Однією з ключових переваг MOCVD (CVD з метал-органічних прекурсорів) росту сегнетоелектричних плівок для застосування в FeRAM є можливість знизити температуру процесу до температури від 370 до 570 °C, що має важливе значення для блокування взаємної дифузії між плівками сегнетоелектриків і плівками електродів. Наприклад, SBT і PZT плівки, що мають хороші сегнетоелектричні властивості, отримані відповідно при 415 і 570 °C.

Знизити температуру зростання можна також завдяки імпульсному процесу CVD, названому атомно-шаровим осадженням (ALD). Цей ефект пояснюється прискоренням розкладання вихідних прекурсорів і міграцією адсорбованих частинок, а також випаровуванням надлишкового Pb і Bi з поверхні протягом паузи подачі прекурсорів. У випадку отримання плівок PZT, було також показано, що наявність джерела  $\text{PbTiO}_3$  призводить не тільки до

поліпшення якості морфології поверхні PZT кристалів, а й знижує температуру епітаксiального росту. Плівки, вирощені на  $\text{PbTiO}_3$ , що має структуру, аналогічну структурі перовскіту PZT та відносно невелику невідповідність решітки, забезпечує кращу кристалічність навіть за нижчих температур підкладки.

### 2.3 Імпульсне лазерне осадження

Імпульсне лазерне осадження (ІЛО) розглядається як один з найбільш підходящих методів для отримання тонких плівок оксидів. Його широко використовують для осадження плівок сегнетоелектричних матеріалів. Процеси взаємодії лазерного випромінювання з розпорошеною мішенню під час ІЛО залежать від параметрів лазерного імпульсу і властивостей матеріалу мішені. Як і в разі розпилення, у газовому розпилювачі для ІЛО використовуються композитні керамічні мішені як вихідний матеріал плівок. На відміну від ВЧ розпилення в ІЛО для абляції матеріалу мішені застосовують короткі та інтенсивні імпульси ексимерних лазерів. Інтенсивний лазерний промінь проходить крізь оптичне вікно у вакуумну камеру і спрямовується на мішень, де він частково поглинається і відбувається випаровування матеріалу. Щільність потужності випромінювання лазера, необхідна для випаровування матеріалу, залежить від складу мішені, її морфології, довжини хвилі та тривалості лазерного імпульсу. Матеріал, випарений променем, потім конденсується на підкладці, де відбувається процес зростання плівки. Як і в разі розпилення в газовому розряді, для компенсації втрати летких компонентів ( $\text{Pb}$  або  $\text{Bi}$ ) у процесі росту також використовуються мішені з надлишком  $\text{Pb}$  або  $\text{Bi}$ . Процес отримання плівок може бути доповнений або реактивним газом у камері, або іонним джерелом для впливу на процес абляції та взаємодію променю з випаровуваним матеріалом у газовій фазі або поверхні підкладки. Такий процес називають реактивним ІЛО.

Лазерна абляція для отримання тонких плівок має низку переваг порівняно з іншими методами. По-перше, джерело енергії розташоване за межами камери

осадження, що полегшує управління ним і вибір моделі для випаровування конкретного матеріалу. По-друге, можна випаровувати практично будь-який матеріал підбором параметрів випромінювання лазера. По-третє, швидкістю осадження можна керувати вибором параметрів імпульсного випромінювання. По-четверте, локальна концентрація потужності в імпульсі випромінювання лазера призводить до миттєвого випаровування всіх компонентів вихідного матеріалу і перенесення їх на підкладку практично без зміни складу.

Водночас ІЛО має деякі недоліки:

- генерація макроскопічних частинок, що складаються з безлічі атомів;
- наявність дефектів, викликаних у зростаючій плівці бомбардуванням частинками високої кінетичної енергії;
- неоднорідний потік через кутовий розподіл енергії у факелі абляції, що складно адаптує цю техніку до нанесення плівок на підкладки великої площі, тобто для промислового виробництва.

Проте, необхідні властивості плівок у досить широких межах можна змінювати регулюванням численних параметрів осадження:

- тиск навколишнього газу;
- тип і температура підкладки;
- відстань підкладка - мішень і геометрія мішень - підкладка;
- склад мішені;
- діаметр лазерної плями;
- щільність енергії;
- довжина хвилі;
- частота проходження імпульсів

Усі ці чинники мають суттєвий вплив на швидкість осадження, стехіометрію, фазовий склад і якість кристалічної структури сегнетоелектричних плівок .

### 3 ГРАДІЄНТНІ ПЛІВКИ BST

Градiєнтнi структури активно дослiджуються для вдосконалення параметрiв сучасних мiкроелектронних структур i створення перспективних. Опублiковано значну кiлькiсть наукових праць за цiєю темою, в яких аналізуються переваги багат шарових структур над однорiдними тонкими плiвками, а також пропонуються способи вдосконалення градiєнтних структур: полiпшення електрофiзичних характеристик, пiдвищення температурної стабiльностi тощо. Розв'язання цих питань дає можливiсть зняти деякi обмеження на використання сегнетоелектричних матерiалiв у технiцi НВЧ, i використовувати їх поряд з напiвпровiдниковими та феритовими матерiалами.

Одним iз перспективних матерiалiв для застосування в галузi створення градiєнтних структур є титанат барiю-стронцiю.

У роботi наводяться залежнiсть компонентного складу вiд тиску робочого газу в процесi осадження плiвок BST (рис. 3.1).

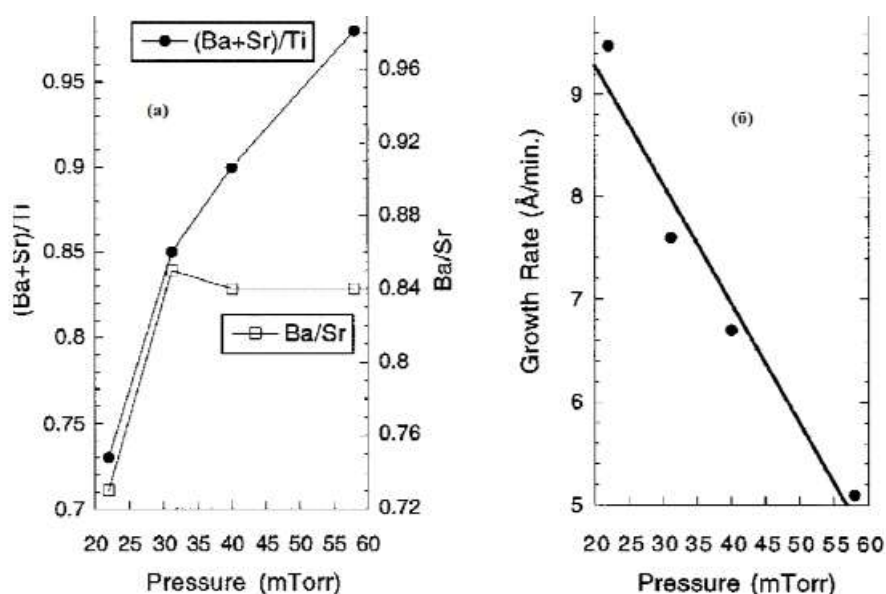
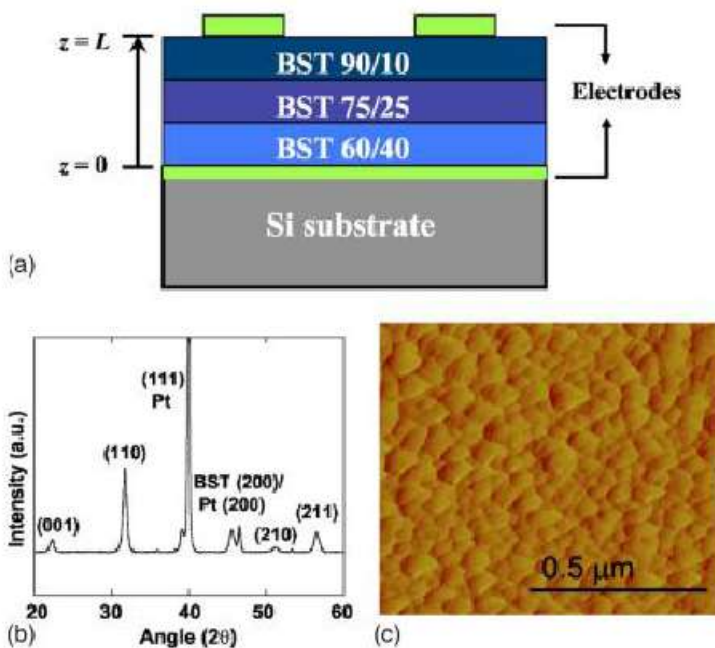


Рисунок 3.1 - Залежнiсть компонентного складу (а) i швидкостi росту (б) вiд тиску



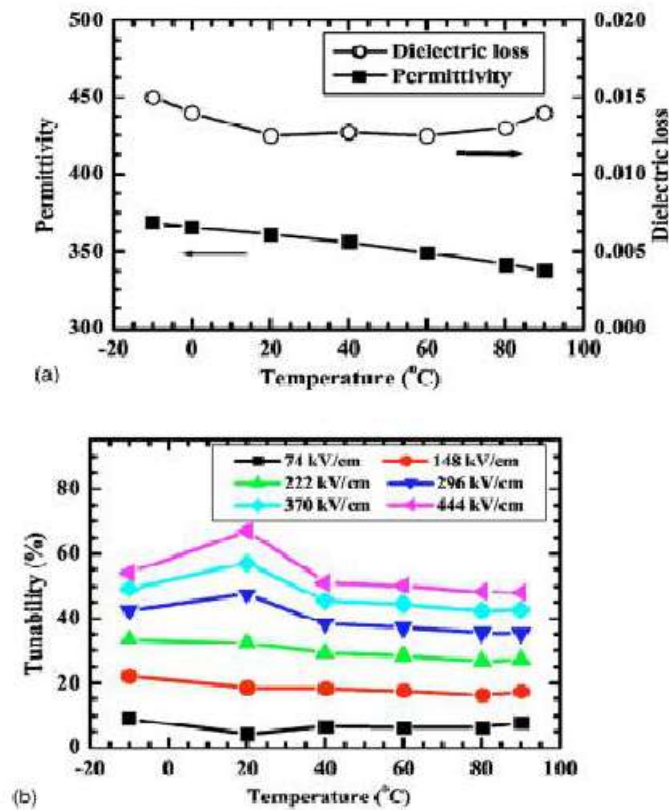
У роботі аналізується багатошарова BST структура, зображена на рис. 3.2(a) що володіє чудовими діелектричними властивостями і високою керованістю, а діелектричні втрати є стабільними в широкому діапазоні температур.



а) - схематичне зображення структури; б) - рентгенівська дифрактограма;  
с) - АСМ - скан поверхні

Рисунок 3.2 - Багатошарова BST структура наведена багатошарова структура BST

створена на Si підкладці, вкритий плівкою Pt, з використанням технології MOCVD і складалася з трьох окремих шарів номінальною товщиною 220 нм з такою зміною складу (Ba/Sr), як BST 63/37, BST 78/22, і BST 88/12. Шорсткість поверхні становила 3.479 нм. Отримана структура за кімнатної температури має мале значення діелектричної проникності 360 з тангенсом кута діелектричних втрат 0.012 та керованістю 65% за напруженості поля  $4,4 \cdot 10^5 \text{ В/см}$  (рис.3.3).



а) - залежність діелектричної проникності та тангенса кута діелектричних втрат від температури; б) - температурна залежність керованості за різних значень напруженості електричного поля

Рисунок 3.3 - Властивості багат шарових BST структур

Таким багат шаровим структурам властивий мінімальний розкид діелектричної проникності від температури в діапазоні від -10 $^{\circ}\text{C}$  до 90 $^{\circ}\text{C}$ , що пояснюється за допомогою термодинамічної моделі, яка включає електричні, механічні, електромеханічні взаємодії між BST шарами. Такі багат шарові або градієнтні плівки можуть бути застосовані в наступному поколінні пристроїв нечутливих до зміни температури. В огляді, присвяченому порівнянню температурних та електрофізичних властивостей однорідних і градієнтних плівок BST, наведені дані (таблиця 1) за температурним коефіцієнтом ємності багат шарових структур на основі плівок сегнетоелектриків із різним співвідношенням компонент.

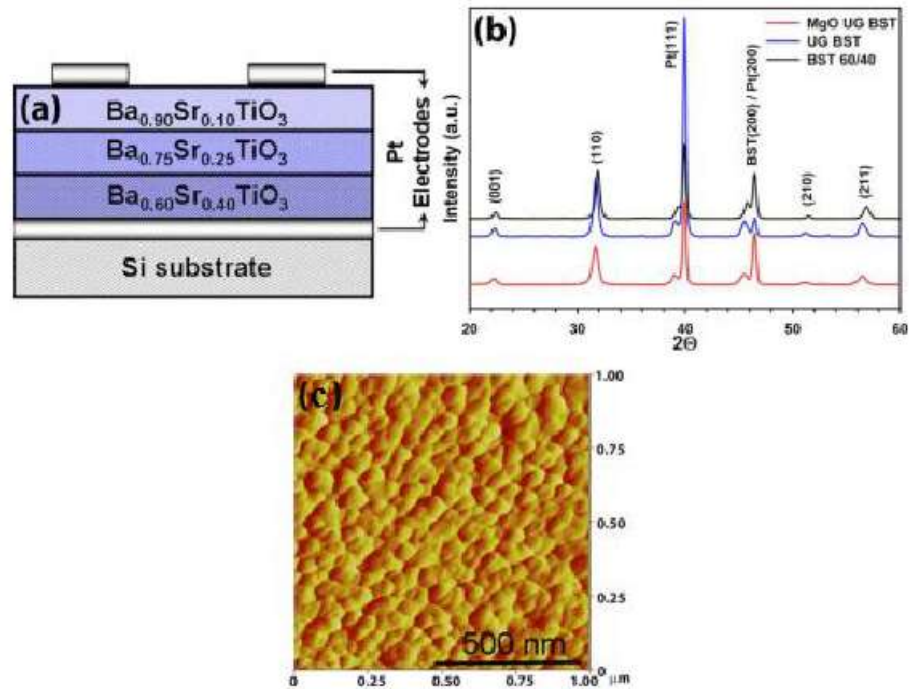
Таблиця 1 - Порівняння властивостей неоднорідних і однорідних за складом тонких плівок BST: діелектричних властивостей, ТКЄ і температурної зміни діелектричної проникності по відношенню до 20°C

Ba <sub>0.50</sub> Sr <sub>0.50</sub> TiO <sub>3</sub> LAO (Sol-gel- 600nm)	2934	0.01	-8.52	60 ↓	-11.52	35 ↑
Ba <sub>0.60</sub> Sr <sub>0.40</sub> TiO <sub>3</sub> PtSi (MOSD-240 nm)	176	0.024	-2.9	20 ↓	0.83	3 ↓
Ba <sub>0.50</sub> Sr <sub>0.50</sub> TiO <sub>3</sub> /MgO -layer LAO (Sol-gel- 600 nm)	1932	0.005	-6.89	52 ↓	-14.3	43 ↑
UG (75/25-80/20- 90/10-BT) LSMO/LAO (PLD- 800 nm)	1650	0.225	-2.16	15 ↓	-	-
DG (BT-90/10- 80/20-75/25) MgO (PLD-450nm)	475	-	6.66	44.7 ↑	2.25	25 ↑
Состав, подложка/метод осаждения	$\epsilon_r$ (20°C)	$\tan \delta$ (20°C)	TКC <sub>20-90</sub> (ppt/°C)	$\Delta\epsilon_r$ (20-90%)	TКC <sub>20-(-10)</sub> (ppt/°C)	$\Delta\epsilon_r$ (20-(-10)%)
Ba <sub>0.5</sub> Sr <sub>0.5</sub> TiO <sub>3</sub> LSCO/MgO(PLD- 210 nm)	410	0.021	-7.32	51 ↓	-4.1	12.2 ↑
Ba <sub>0.24</sub> Sr <sub>0.76</sub> TiO <sub>3</sub> PtSi (Sputer-100 nm) (Pervez et al. 2004)	320	-	-4.0	20 ↓	-2.1	6.2 ↑
UG (60/40-75/25- 90/10) PtSi (MOSD-270 nm)	360	0.122	-0.921	6.4 ↓	-0.716	2.1 ↑
UG (60/40-75/25- 90/10)+Mg 5 mol%, PtSi (MOSD-270 nm)	316	0.018	-0.94	6.6 ↓	-1.14	3.4 ↑

Значення температурного коефіцієнта ємності досягають порядку  $10^{-3}\text{K}^{-1}$  у діапазоні температур від 20 до 90 <sup>(o)</sup> C. Найкраща отримана температурна стабільність наведена в роботі для плоскопаралельних (МДМ) конденсаторів на основі двох шарів із вмістом Ba 50 і 90%. Величина ТКЄ не перевищувала  $10^{-4}\text{K}^{-1}$  в діапазоні температур від 25 до 125 <sup>(o)</sup> C, що можна порівняти з аналогічною величиною для напівпровідникових елементів.

Було відзначено, що властивості багат шарової структури залежать не тільки від співвідношення компонент у шарах, а й від їхньої товщини та розташування в структурі. Згідно з роботою було вирощено та досліджено

багатошарові леговані MgO структури BST, , номінальною товщиною 220 нм з наступною зміною складу в шарах (Ba/Sr), як BST 60/40, BST 75/25 та BST 90/10, що зображено на рис. 3.4(a). Також для порівняння були виготовлені не леговані багатошарові BST структури та однорідні BST 60/40 плівки.



а) - схематичне зображення структури; б) - рентгенівська дифрактограма різних структур; с) - АСМ-скан поверхні

Рисунок 3.4 - Багатошарова BST структура

У результаті досліджень було також з'ясовано, що легування магнієм знижує діелектричні втрати ( $\text{tg}\delta = 0.008$ ) порівняно з нелегованою багатошаровою BST плівкою (рис.3.5). Леговані Mg плівки виявляють хорошу температурну стабільність із температурними коефіцієнтами ємностей  $-0.94$  і  $1.14$  ppt/ $^{\circ}\text{C}$  у діапазонах зміни температур від  $20$  до  $90$   $^{\circ}\text{C}$  і від  $20$  до  $-10$   $^{\circ}\text{C}$ , відповідно.

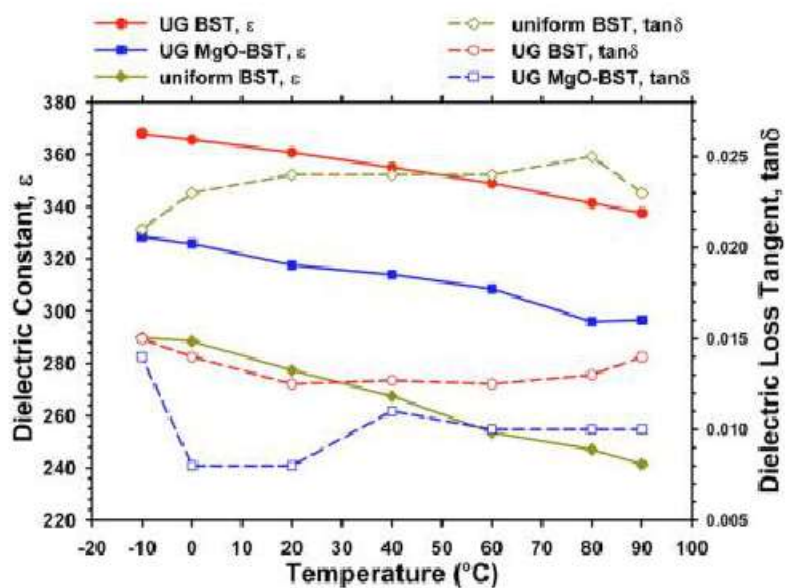


Рисунок 3.5 - Температурна залежність діелектричної постійної і тангенса кута діелектричних втрат однорідної, багат шарової нелегованої і багат шарової легованої магнієм плівок BST

Легована Mg плівка показує середню керованість близько 29% (рис. 3.6), на відміну від нелегованої плівки, що має керованість близько 65% за напруженості поля  $4,4 \cdot 10^5$  В/см.

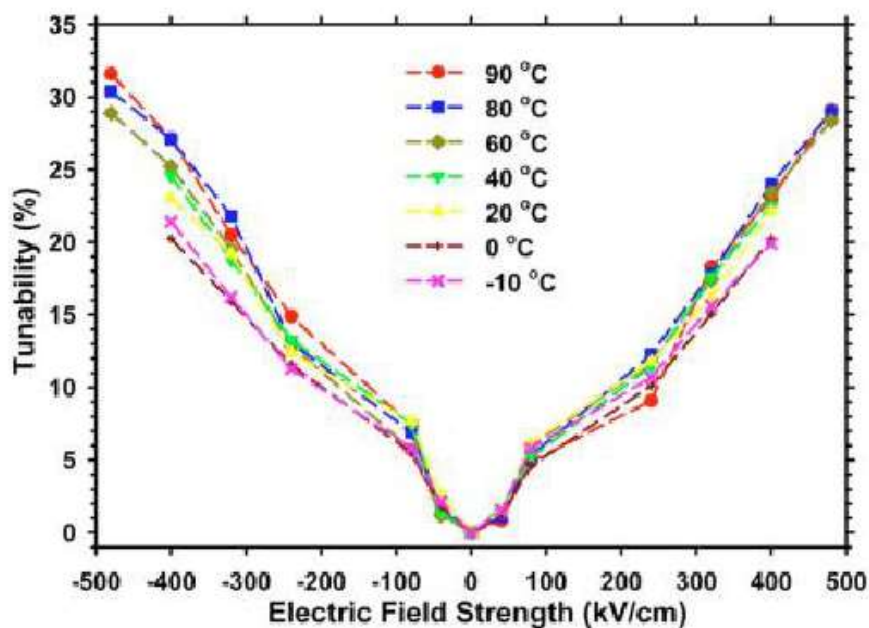


Рисунок 3.6 - Зміна керованості для легованої багат шарової тонкої плівки BST за різних температур

Okatan і Cole , розробили термодинамічну модель для аналізу впливу відмінності коефіцієнтів теплового розширення багат шарової сегнетоелектричної плівки титанату барію-стронцію  $Ba_{1-y}Sr_yTiO_3$  і підкладки на діелектричні властивості. При розробці до уваги бралися електростатичні та електромеханічні взаємодії між сегнетоелектричними шарами. Було з'ясовано, що нижчі температури обробки призводять до зниження теплових деформацій і, таким чином, кращих діелектричних властивостей. Також було проведено чисельний аналіз для опису впливу теплових деформацій на діелектричні властивості градієнтної плівки BST (BST 60/40, BST 75/25 і BST 90/10) на різних підкладках: Si сапфір ( $\alpha-Al_2O_3$ ,  $SrTiO_3$ ,  $MgO$ , і  $LaAlO_3$ ). Градієнтні структури титанату барію-стронцію, з профілем складу, представленим на рис. 20, наносилися методом MOCVD на сапфірові підкладки з Pt електродами . Для досліджень за допомогою іонного фрезерування та фотолітографії були виготовлені перебудовувані плоскопаралельні конденсатори на основі цих структур. Конденсатори забезпечили керованість величиною 36% при напрузі  $\pm 13V$  на частоті 1 МГц. Ці керовані конденсатори були об'єднані з резонаторами, виготовленими на FR-4 підкладках, щоб сформувати перебудовувані ВЧ фільтри. Центральна частота фільтрів могла бути перебудована з 3.710 ГГц до 4.062 ГГц з додатком напруги зміщення в 12 В.

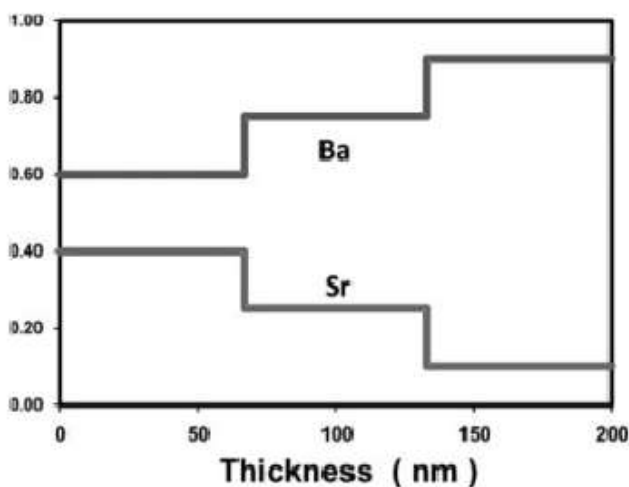


Рисунок 3.7 - Профіль складу BST плівок

У роботі методом MOCVD на Pt/Ti/SiO<sub>2</sub>/Si підкладки з орієнтацією (111) наносили багат шарову (Ba<sub>0.9</sub>Sr<sub>0.1</sub>TiO<sub>3</sub>/Ba<sub>0.75</sub>Sr<sub>0.25</sub>TiO<sub>3</sub>/Ba<sub>0.6</sub>Sr<sub>0.4</sub>TiO<sub>3</sub>) та однорідну (Ba<sub>0.75</sub>Sr<sub>0.25</sub>TiO<sub>3</sub>) плівки BST.

Порівняно з однорідною BST плівкою, багат шарова BST плівка демонструє поліпшені електричні властивості з меншим струмом витоку, більшою діелектричною проникністю (370) і високою керованістю (50%). Це пов'язано з багат шаровою структурою і деформацією, що виникає при взаємодії між шарами структури.

Досліджувалися також градієнтні тонкі плівки BST, леговані марганцем, отримані технологією імпульсного лазерного осадження. Для вимірів діелектричних властивостей шаруватих плівок BST, виготовлених на підкладках з MgO і сапфіра, використовувалися тестові компланарні хвилевідні структури. Випробувані структури були виготовлені як на чистих підкладках, так і на тонкоплівкових зразках для визначення загасання і фазової сталої у варіантах із сегнетоелектричною плівкою і без неї. Діелектрична проникність плівки, легованої Mn, становила приблизно 1200 у діапазоні частот від 15 до 30 ГГц із середнім значенням тангенса кута діелектричних втрат 0.033 .

У роботі двошарові плівки Bi<sub>1-5</sub>Zn<sub>1.0</sub>Nb<sub>1.5</sub>/O7Ba<sub>0.6</sub>Sr<sub>0.4</sub>TiO<sub>3</sub> з орієнтацією (111) та товщиною 500 нм було виготовлено на підкладках зі структурою Pt/TiO<sub>x</sub>/SiO<sub>2</sub>/Si методом магнетронного розпилення. Результати вимірювань показували, що шар BZN покращує діелектричні властивості плівок. Зі зростанням товщини BZN, діелектричні втрати істотно знижуються (рис.3.8), і в допустимих межах знижується керованість (рис.3.9). Обговорювався вплив товщини в моделі конденсаторів з багат шаровим діелектриком і розраховувалася діелектрична проникність. За напруженості електричного поля 4-10<sup>5</sup>В/см середня керованість становила 50.55%, у двошаровій плівці BZN (50 нм)/BST (450 нм) можуть бути досягнуті низькі діелектричні втрати (0.011) та висока добротність (46.8).

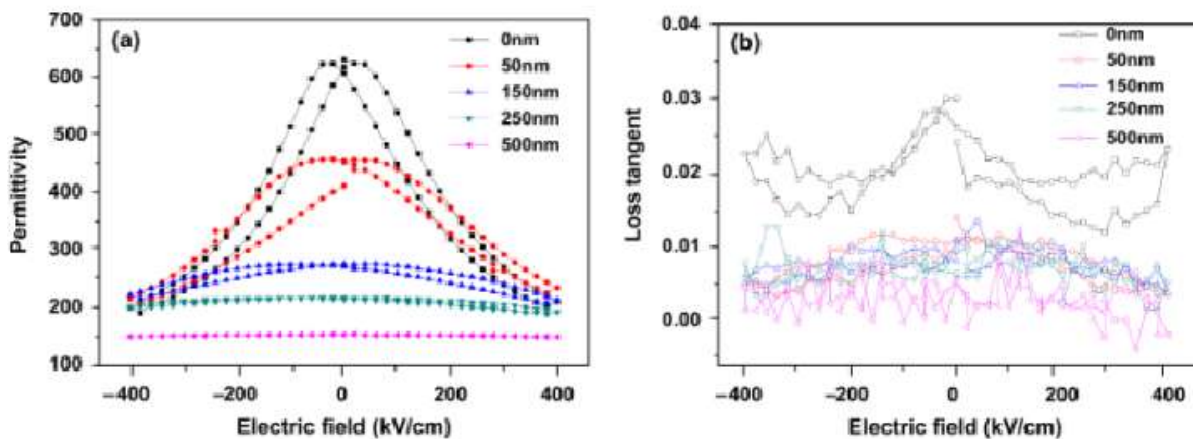


Рисунок 3.8 - Діелектрична проникність і тангенс кута діелектричних втрат двошарової BZN/BST плівки з різною товщиною шару BZN

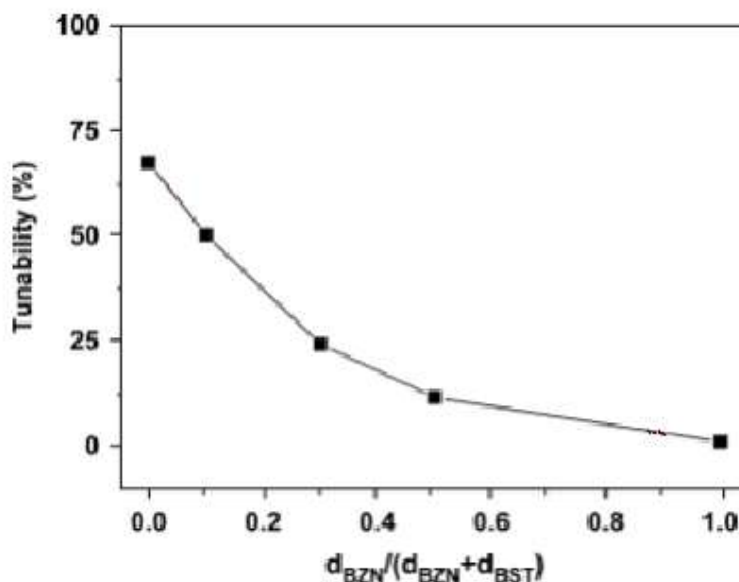


Рисунок 3.9 - Залежність керованості від товщини BZN шару

Тонкі плівки  $Ba_xSr_{1-x}TiO_3$  є хорошими кандидатами для застосування в DRAM і пристроях НВЧ. Однак, ці плівки зазвичай мають значення тангенса кута діелектричних втрат (вище 0.01) на надвисоких частотах. Для поліпшення кристалічності та зменшення НВЧ втрат може бути застосований прошарок матеріалу з хорошими НВЧ властивостями. У роботі, запропоновано тонкий буферний шар  $Ba(Mg_{1/3}Ta_{2/3})O_3$  (ВМТ) для забезпечення низьких втрат, досліджувався вплив цього шару на тонку плівку  $Ba_{0.4}Sr_{0.6}TiO_3$ . Для отримання



тонких плівок було використано імпульсний лазерний метод осадження на сапфірових підкладках. Слід зазначити, що рентгенограми BST/BMT свідчать про те, що з введенням BMT плівки зростають з орієнтацією (111), і зі збільшенням товщини цього шару цей вплив є більш очевидним.

Діелектричні постійні тонких плівок BST зменшуються монотонно зі збільшенням товщини BMT. На противагу цьому, зміна  $\tan \delta$  не є монотонною, коли буферний шар BMT осаджують протягом 10-20 хвилин (рис. 3.10).

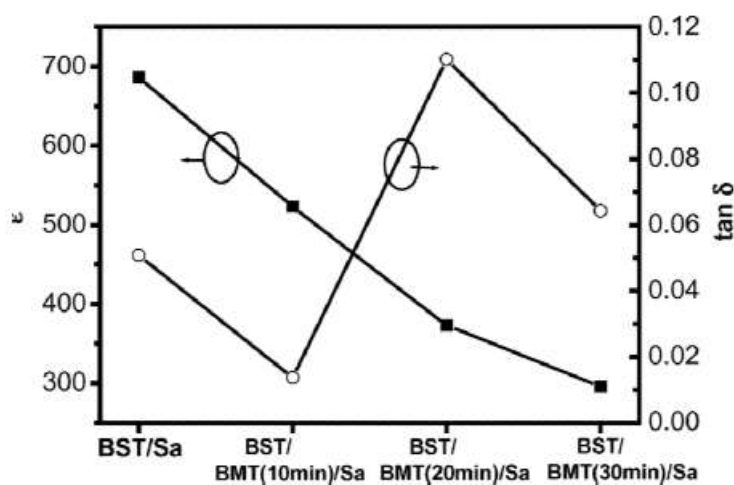


Рисунок 3.10 - Залежність діелектричної постійної та тангенса діелектричних втрат тонких плівок BST, осаджених на сапфірові підкладки з BMT буферним шаром різної товщини

Градiєнтні тонкі плівки титанату барію-стронцію ( $\text{Ba}_{0.6}\text{Sr}_{0.4}\text{TiO}_3/\text{Ba}_{0.75}\text{Sr}_{0.25}\text{TiO}_3/\text{Ba}_{0.9}\text{Sr}_{0.1}\text{TiO}_3/\text{Ba}_{0.9}\text{Sr}_{0.1}\text{TiO}_3$ ) завтовшки 220 нм було виготовлено на вкритих Pt кремнієвих підкладках (рис. 3.11) з високим питомим опором за технологією MOCVD. Спектроскопія резерфордівського зворотного розсіювання показує компонентну відмінність шарів і взаємодифузію важких елементів. Порівнюються діелектричні властивості однорідної параелектричної та градiєнтної плівок.

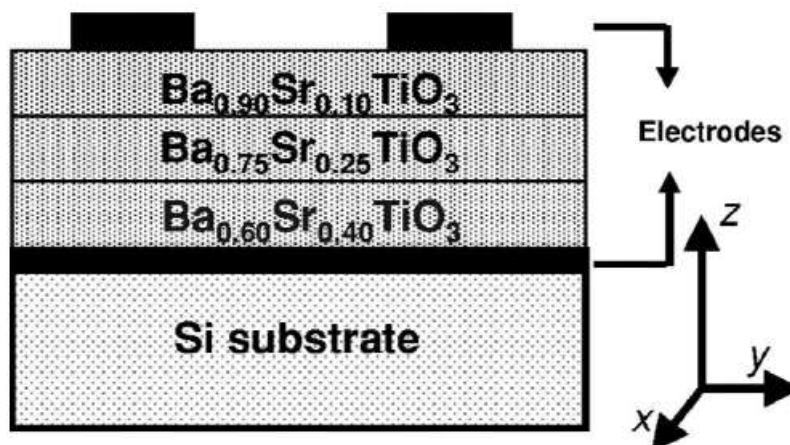


Рисунок 3.11 - Схематичне зображення градієнтної тонкої плівки

На рис.3.12 представлено залежність керованості однорідної та градієнтної плівок BST за кімнатної температури(рис.3.12). Градієнтна плівка проявляє високе значення діелектричної проникності (360) і низький тангенс кута діелектричних втрат (0.012), а також зберігає стабільність параметрів у широкому діапазоні температур, що робить ці плівки перспективними для використання в приладах НВЧ-техніки, що підлаштовуються, з широким температурним діапазоном експлуатації.

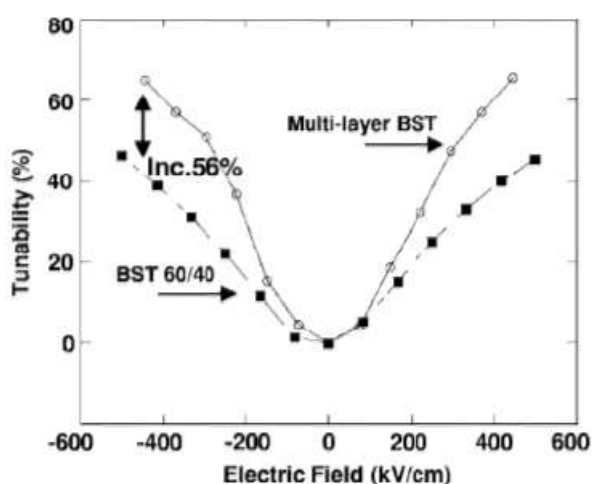


Рисунок 3.12 - Керуваність при кімнатній температурі

Активно досліджується можливість створення градієнтних плівок BST, використовуючи процеси іонно-плазмового осадження та керуючи потоками елементів зростаючої плівки. У такому разі, використовуючи єдине джерело

матеріалу певного складу, осаджуються плівки SE із властивостями, що змінюються за товщиною: компонентним складом і параметрами кристалічної ґратки. Таке рішення дає змогу узгодити кристалічні ґратки SE плівок і підкладок із різних матеріалів, мінімізувати товщину дефектних шарів на межах розділу, а отже, керувати такими електрофізичними характеристиками сегнетоелектричних структур, як ВЧ втрати, швидкодія, температурна залежність властивостей. Механізми зародження і формування шарів у разі осадження з газової фази в основному визначаються такими технологічними параметрами, як тиск робочого газу, парціальний тиск хімічно активних газів, температура конденсації і швидкість нарощування шару. Зі свого боку, температура і швидкість осадження визначають ступінь перенасиченості парів, а зниження робочого тиску збільшує енергію атомів у момент їхнього осадження. Ці фактори визначають фазовий і компонентний склад, розміри кристалітів, морфологію поверхні плівки і якість перехідних шарів.

## ВИСНОВКИ

Сегнетоелектрики представляють собою активні діелектрики, що відіграють ключову роль у сучасному матеріалознавстві та електроніці завдяки своїм унікальним властивостям. Їхня нелінійна залежність поляризації від електричного поля, наявність спонтанної поляризації та доменної структури нижче температури Кюрі, а також високі значення діелектричної проникності роблять їх незамінними для широкого спектру застосувань.

Під час огляду було виявлено, що ці матеріали можуть бути використані не лише як класичні діелектрики, а й як функціональні компоненти, що забезпечують передові можливості у різних галузях. Вони дозволяють створювати пристрої з оборотністю постійної поляризації, що проявляється у характерній петлі гістерезису, а також матеріали, чії діелектричні властивості можуть бути керовані зовнішнім електричним полем та температурою.

Сегнетоелектрики можуть доповнюватися або замінюватися іншими матеріалами з подібними функціональними можливостями, але кожен з них має свої переваги та недоліки, які слід враховувати при виборі найбільш підходящого рішення для конкретного застосування. Незважаючи на різноманітність технологій, важливо ретельно аналізувати потреби та вимоги для вибору оптимального рішення. Інтеграція таких матеріалів не лише підвищує функціональність пристроїв, але й сприяє мініатюризації та оптимізації їхніх характеристик. Розуміння та впровадження сучасних технологій на основі сегнетоелектриків є важливими факторами для покращення продуктивності та розширення можливостей в таких сферах, як НВЧ-техніка, енергонезалежна пам'ять, датчики та виконавчі механізми.

Отже, сегнетоелектрики є важливими елементами сучасної матеріальної та електронної інфраструктури, що забезпечують інноваційні рішення для

передових технологій. Їх використання дозволяє зменшити обмеження традиційних матеріалів та забезпечити нові функціональні можливості, що є ключовим для безперервного розвитку різних галузей промисловості та наукових досліджень.

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Aftab A. Electrically tunable materials for microwave applications // Applied Physics Reviews. 2015, Vol. 2.  
<https://pubs.aip.org/aip/apr/article/2/1/011302/123582/Electrically-tunable-materials-for-microwave>
2. Ferroelectric materials for microwave tunable applications / A.K. Tagantsev, V.O. Sherman, K. F. Astafiev et al. // Journal of Electroceramic. 2003, Vol. 11. P. 5–66.  
<https://link.springer.com/article/10.1023/B:JECR.0000015661.81386.e6>
3. Barranco A.P. Advances in Ferroelectrics. Havana: InTech, 2012. 532 p.  
<https://core.ac.uk/download/478111982.pdf>
4. Joseph V. M. Graded Ferroelectrics, Transpacitors And Transponents. Dordrecht: Springer, 2005. 161 p. <https://download.e-bookshelf.de/download/0000/0002/98/L-G-0000000298-0002339983.pdf>
5. Cole M.W. Temperature Stabilization of BST Thin Films: A Critical Review // Ferroelectrics. 2014, Vol. 470. P. 67–89. 1  
<https://discovery.researcher.life/article/temperature-stabilization-of-bst-thin-films-a-critical-review/daaca7f5546b3b50babe2f5246acf262>
6. Muralt P. Ferroelectric thin films for micro-sensors and actuators: A review // Journal of Micromechanic. 2000, Vol. 10. P. 136–146.  
<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0960-1317/10/2/307>
7. Roelofs A., Schneller T., Szot K., Waser R. / Towards the limit of ferroelectric nanosized grains // Nanotechnology. 2003, Vol. 14. P. 250–257.  
[https://www.researchgate.net/publication/30047257\\_Towards\\_the\\_limit\\_of\\_ferroelectric\\_nanosized\\_grains](https://www.researchgate.net/publication/30047257_Towards_the_limit_of_ferroelectric_nanosized_grains)