

## РАДІОЕЛЕКТРОННЕ МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

---

УДК621.396.011

Васьків Григорій

ДУ “Львівська політехніка”, кафедра конструювання  
та технології виробництва радіоапаратури

### ТОНКОПЛІВКОВІ СЕГНЕТОЕЛЕКТРИЧНІ МАТЕРІАЛИ В ТЕХНІЦІ НВЧ

© Васьків Григорій, 2000

**Описані основні властивості сегнетоелектриків, наведено результати досліджень тонкоплівкових зразків, залежність їх  $\epsilon$  від температури і концентрації компонентів твердих розчинів, зроблена оцінка діелектричних втрат на НВЧ.**

**In this paper the basic qualities of ferroelectrics, the results of research of thin tape examples and their dependence from  $\epsilon$ , temperature and concentration of components in hard solutions are given. Here is made valuation of dielectric loses on microwave ranger.**

Одночасно з початком застосування феритів і напівпровідників у техніці НВЧ багато промислових фірм і науково-дослідних установ досліджували властивості сегнетоелектричних матеріалів з метою створення нових приладів НВЧ діапазону. Принципове зрушення в напрямку створення практично придатних приладів і пристроїв почалося тоді, коли було отримано плівкові сегнетоелектрики, які створюються безпосередньо на діелектричній підкладці з високою теплопровідністю або на металевій основі. Такі плівки одержують термічним вакуумним випаровуванням або керамічною технологією.

Нині сегнетоелектрики активно конкурують з феритами і напівпровідниками в області НВЧ і все ширше використовуються в системах волоконно-оптичного зв'язку як електрооптичні матеріали. Разом з тим вони технологічно дуже прості і дешеві, мають вищу електричну міцність, рекордно низькі шуми, здатні витримувати без суттєвої зміни характеристик механічні навантаження і вібрацію, можуть працювати при підвищеній вологості повітря (до 98% відносної вологості) і в розрідженій атмосфері. Сегнетоелектрики виявляють високу радіаційну стійкість до дії різноманітних опромінь, пучків швидких електронів  $\gamma$ -випромінювання  $Co^{60}$  і змішаного випромінювання.

Найбільш поширені сегнетоелектрики на основі  $BaTiO_3$ ,  $SrTiO_3$  і  $LiTaO_3$ ,  $LiNbO_3$ . Сегнетоелектрики на основі  $BaTiO_3$  мають реверсивну нелінійність, яка проявляється дією двох напруг: змінної НВЧ і постійної або НЧ змінної, що називається напругою зміщення, чи керуючою напругою. Під дією напруги зміщення діелектрична проникність  $\epsilon$  змінюється в десятки разів, але на значення  $\epsilon$  впливає і зміна температури. З наближенням температури до точки Кюрі  $\epsilon$  буде максимальною, відбувається перехід сегнетоелектрику з пара-

електричної фази в сегнетоелектричну. Для звичайних діелектриків діелектрична сприйнятливність  $\chi$  мало залежить від температури [1], тому

$$P = \chi E,$$

де  $P$  – поляризованість;  $E$  – напруженість електричного поля.

Сегнетоелектрики навіть поза областю спонтанної поляризації характеризуються своєрідною температурною залежністю діелектричної сприйнятливності:

$$\chi = (T - \theta) = \text{const},$$

де  $T$  – робоча температура;  $\theta$  – температура Кюрі.

Внаслідок того, що для сегнетоелектриків  $\epsilon$  практично пропорційна  $\chi$ , закон Кюрі-Вейса може бути записаний у такому вигляді:

$$\epsilon(T - \theta) = \text{const}.$$

При переході через точку Кюрі стрибкоподібно змінюються ряд властивостей сегнетоелектрика: структура кристалічної ґратки, показник заломлення світла, теплоємність та інші властивості. Сегнетоелектрики одночасно деякою мірою є і п'єзоелектриками, отже, в сегнетоелектричній фазі виникає електрострикційна деформація. Вищеперераховані фактори унеможливають використання сегнетоелектриків у сегнетоелектричній фазі для НВЧ. Виготовляючи плівкові сегнетоелектрики, необхідно так підбирати концентрацію компонентів, щоб точка Кюрі знаходилася поза межами робочих температур пристрою, тобто робота в параелектричній фазі.

Сегнетоелектрики, у яких механізм виникнення спонтанної поляризації при фазовому переході зв'язаний із зміщенням іонів, називаються сегнетоелектриками типу “зміщення”, вони поділяються на дві групи: групу перовскіту ( $\text{BaTiO}_3$ ,  $\text{SrTiO}_3$  та інші) і групу псевдоільменіту ( $\text{LiTaO}_3$ ,  $\text{LiNbO}_3$  та інші).

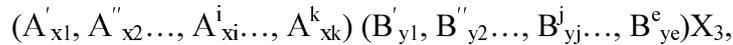
Сегнетоелектрики групи перовскіту можуть існувати у виді монокристалів або кераміки. Характерною особливістю кристалів цієї групи є наявність кисневого октаедра, всередині якого розміщений чотиривалентний іон  $\text{Ti}$  чи інший іон з малим іонним радіусом. У параелектричній фазі кристали цієї групи мають кубічну структуру. У вершинах куба розміщені іони  $\text{Ba}$  чи  $\text{Sr}$ . Іони кисню розміщені в центрах граней куба, утворюючи октаедр. Виникнення спонтанної поляризації у сегнетоелектрику групи перовскіту здійснюється за рахунок зміщення іонів титану до одного з іонів кисню, при цьому ґратка деформується і стає тетрагональною. Важливою особливістю таких сегнетоелектриків є здатність утворювати тверді розчини із з'єднаннями аналогічної структури, наприклад,  $\text{BaTiO}_3 - \text{SrTiO}_3$ , що дає змогу створювати кераміку з наперед заданими властивостями для реалізації різноманітних НВЧ-пристроїв.

Для з'єднання  $\text{ABX}_3$  з структурою перовскіту (де  $A$  і  $B$  – катіони,  $X$  – аніони) обов'язковим є виконання двох геометричних умов, які забезпечують щільне розміщення атомів і визначають допустимі розміри катіонів  $A$  і  $B$  і аніонів  $X$ .

$$R_B \geq 0,41R_X; t_1 < t = \frac{R_A + R_X}{\sqrt{2}(R_B + R_X)} < t_2,$$

де  $R_B$  і  $R_X$  – табличні іонні радіуси, які приписують іонам з координатним числом  $b$ , а  $R_A$  – табличний радіус для координаційного числа 12. Значення  $t$  близьке до одиниці, але, як правило, відрізняється від неї і лежить в межах від  $t_1 = 0,76$  до  $t_2 = 1,03$ . Виконання тільки однієї умови є недостатнім для утворення перовскітової структури.

У складних перовскітових з'єднаннях загальна хімічна формула може мати такий вигляд:



де  $\sum_{i=1}^k x_i = 1$  і  $\sum_{j=1}^e y_j = 1$  ( $x_i > 0$ ;  $y_j > 0$ )

Повинна зберігатись електронейтральність кристала:

$$\sum_{i=1}^k x_i n_A(i) + \sum_{j=1}^e y_j n_B(j) + 3n_X = 0,$$

де  $n_A(i)$ ,  $n_B(j)$  і  $n_X$  – валентність відповідних іонів, а також умови:

$$t_1 < t = \frac{\bar{R}_A + R}{\sqrt{2}(R_B + R_X)} < t_2; \quad a_1 < \frac{R_A(i)}{R_X} < a_2;$$

$$b_1 < \frac{R_B(j)}{R_X} < b_2;$$

де  $\bar{R}_A = \sum_{i=1}^k x_j R_A(i)$  і  $\bar{R}_B = \sum_{j=1}^e y_j R_B(j)$

$a$  і  $b$  – параметри кристалічної ґратки.

Такі умови обмежують розміри іонів  $A^{(i)}$ ,  $B^{(j)}$  і середні радіуси  $\bar{R}_A$ ,  $\bar{R}_B$ .

Якщо  $X$  – іон кисню  $O^2$ , то комбінуючи іони з різними валентностями, можна отримати різні групи складних перовскітових з'єднань. Необхідно підкреслити, що складні формули, наприклад,  $(A'_x A''_{1-x}) x (B'_y B''_{1-y}) O_3$  і  $A (B'_x B''_y A'''_{1-x-y}) O_3$ , як правило, описують тверді розчини.

Виходячи з вищевказаних міркувань, для досліджень були виготовлені керамічні зразки товщиною 0,2 мм з різними концентраціями компонентів  $BaTiO_3$  і  $SrTiO_3$ . Температурні залежності діелектричної проникності зразків показані на рис.1.

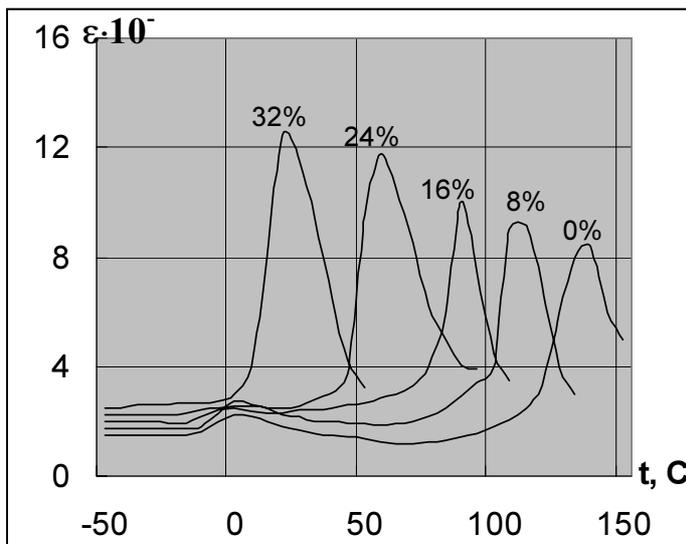


Рис.1. Температурні залежності діелектричної проникності твердих розчинів  $BaTiO_3$  і  $SrTiO_3$  в слабкому електричному полі.

На рис. 1 показаний процентний вміст  $\text{SrTiO}_3$ . Отже, підбираючи склад тонких сегнетоелектричних плівок, можна забезпечити роботу сегнетоелектриків в параелектричній фазі у доволі широкому діапазоні температур.

У плівкових сегнетоелектриках  $\epsilon$  в параелектричній фазі не залежить від частоти і зберігає своє значення до  $f \approx 40$  ГГц, забезпечуючи при таких частотах високу реверсивну нелінійність  $\epsilon(E)$ . Діелектричні втрати при збільшенні частоти для досліджуваних зразків дещо зростають в області частот від 2 до 8 ГГц, а потім зменшуються (рис.2)

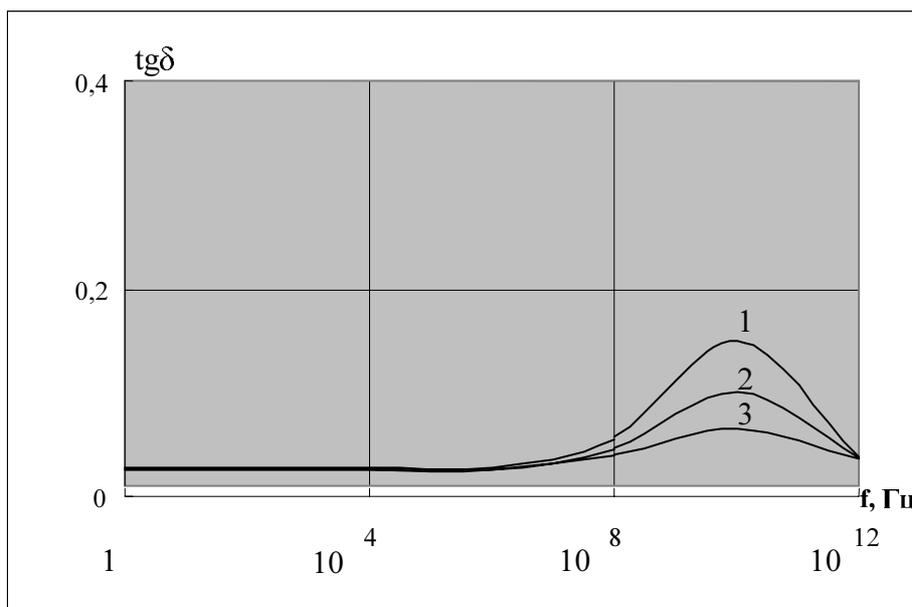


Рис.2. Частотні залежності  $\text{tg}\delta$  твердих розчинів  $\text{BaTiO}_3$  і  $\text{SrTiO}_3$  виміряні в слабкому електричному полі.  
1 –  $\text{BaTiO}_3$ , 2 –  $\text{BaTiO}_3+8\%\text{SrTiO}_3$ , 3 –  $\text{BaTiO}_3+16\%\text{SrTiO}_3$ .

Сегнетоелектричні керамічні плівки все ширше використовуються у мікрохвильовому діапазоні для високочастотних резонаторів, прохідних і режекторних фільтрів, плоских діелектричних антен, мікросмужкових модуляторів, мікрохвильових ІС. Деякі фрагменти таких конструкцій зображені на рис. 3 і 4.

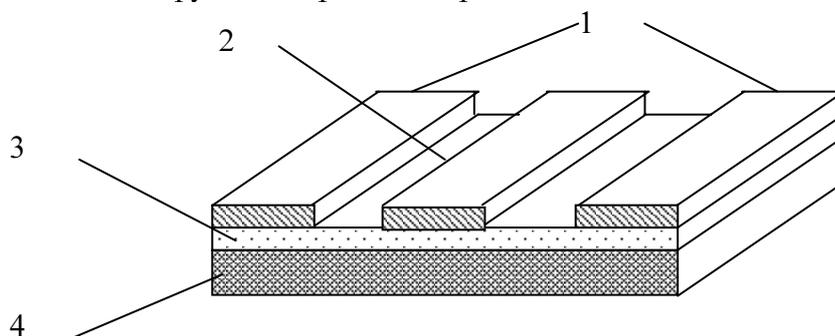


Рис.3. Конструкція планарного триелектродного варіконда.  
1 – НВЧ електроди, 2 – керуючий електрод, 3 – плівка сегнетоелектрика, 4 – діелектрична підкладка.

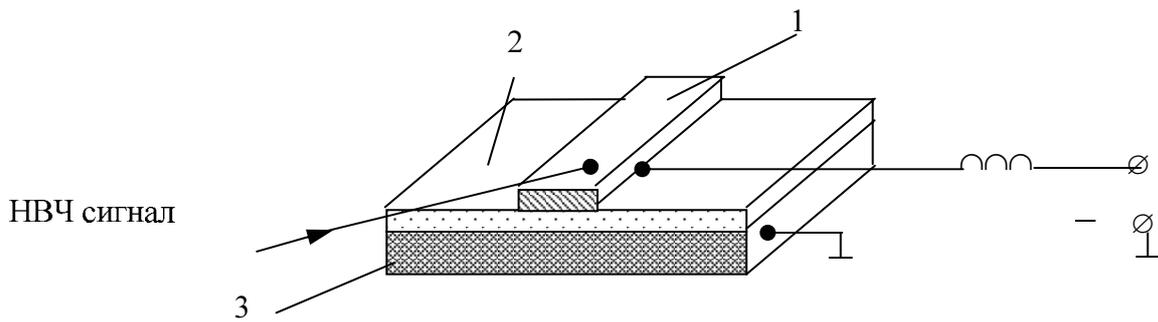


Рис.4. Конструкція планарного модулятора.  
1 – мікросмужкова лінія, 2 – сегнетоелектрична плівка, 3 – металізація.

Сегнетоелектрики групи псевдоїльменіту мають ромбоєдричну структуру, яку можна розглядати як сильно спотворену кубічну перовскітну. Характерною особливістю кристалів групи псевдоїльменіту є висока температура Кюрі ( $1140\text{ }^{\circ}\text{C}$  для  $\text{LiNbO}_3$  і  $650\text{ }^{\circ}\text{C}$  для  $\text{LiTaO}_3$ ), що дає можливість використовувати їх в параелектричній фазі у широкому діапазоні температур як електрооптичні матеріали. Важливим застосуванням таких сегнетоелектриків є модуляція світла. Такі модулятори потрібні для більшості систем оптичного зв'язку. Використання в таких модуляторах високочастотного лазерного світла в якості несучої дає змогу здійснити широкосмугову передачу великої кількості інформації при повній електричній розв'язці між каналами.

В більшості сегнетоелектриків електрооптичних матеріалів показник заломлення на НВЧ області значно більший, ніж в оптичній. Отже, фазове узгодження можна отримати у хвилеводі типу TEM з паралельними плоскими стінками, який частково заповнений кристалом, а решта може бути матеріал із значно меншою діелектричною проникністю, наприклад, неполярні полімери чи повітря. Тоді в даній структурі (рис.5) фазова швидкість модулюючої хвилі зростає порівняно з фазовою швидкістю в кристалі з електродами.

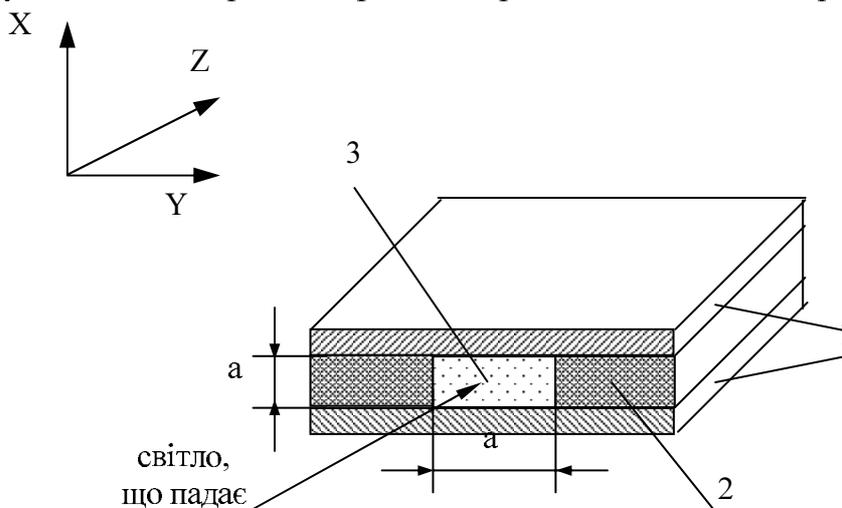


Рис.5. Частково заповнена передавальна лінія з паралельних пластин для модуляторів біжучої хвилі. 1 – провідникові пластини; 2 – діелектрик з малим  $\epsilon$ ; 3 – електрооптичний кристал.

Отже, фазові швидкості можна узгодити, відповідно вибравши геометричні розміри. Даний пристрій, по суті, не має дисперсії близько до модулюючих частот, при яких розмір кристала а стає співрозмірним з довжиною хвилі в середовищі.

Робочу ширину смуги можна визначити приблизно так:

$$\Delta\omega \approx \frac{c}{5a\sqrt{\epsilon}}$$

де а – розміри поперечного перерізу сегнетоелектрика квадратної форми.

У випадку повного фазового узгодження розміри кристала обмежуються дифракцією, а не необхідною шириною смуги.

Модулятори біжучої хвилі з шириною смуги модуляції близько 3 ГГц можна реалізувати на основі LiTaO<sub>3</sub>. Такі кристали використовуються в акустичних пристроях на поверхневих і об'ємних хвилях, п'єзоперетворювачах, смугових фільтрах, резонаторах, лініях затримки, ВЧ акустооптичних модуляторів, також для виготовлення планарних хвилеводних пристроїв управління і модуляції світла в системах волоконно-оптичного зв'язку, вони використовуються в системах нелінійної оптики і електрооптики.

1. Вербицкая Т.Н. Вариконды. Л., М., 1957. 2. Курчатова И.В. Сегнетоэлектричество. М., 1982. Лайнс М., Гласс А. Сегнетоэлектрики и родственные им материалы: Пер с англ., М., 1981. 3. Вендик О.Г., Иванов И.В., Соколов А.И. Сегнетоэлектрики в технике СВЧ. 4. Луцкейкин Г.А. Полимерные электреты. М., 1984. 5. Справочник по электротехническим материалам / Под ред Ю.В. Коричкова, В.В. Пасынкова, Б.М. Тареева. Л., 1988. 6. Леванюк А.П. Физические основы сегнетоэлектрических явлений в кристаллах. М., 1983. 7. Френденфельд Ж. Керамические конденсаторные, пьезо- и сегнетоэлектрические материалы. М., 1982.

УДК 621.382.01

Колодій Зеновій

ДУ “Львівська політехніка”, кафедра теоретичної радіотехніки  
і радіовимірювань

## НИЗЬКОЧАСТОТНІ ФЛУКТУАЦІЇ В РАДІОЕЛЕКТРОННІЙ АПАРАТУРІ

© Колодій Зеновій, 2000

Наведено огляд низькочастотних флуктуацій в елементах радіоелектронної апаратури. Пропонується гіпотеза єдиного джерела їх генерації.

The point of view of low-frequency fluctuations in the elements of radio-electronic aparats is created. The proposition of gain source their generation is proposed.