

Применение резонансных свойств доменной структуры сегнетоэлектрических материалов для энергетически эффективного управления их диэлектрической проницаемостью

Д. В. Заерко, Л. А. Калоша, Л. С. Гайда

*Гродненский государственный университет им. Янки Купалы, Гродно, Беларусь;
e-mail: d.zaerko@grsu.by*

В работе представлены полученные в результате численного и экспериментального исследований зависимости диэлектрической проницаемости сегнетоэлектрического материала от напряженности воздействующего электрического высокочастотного поля на частоте колебаний стенок доменов. Приведена интерпретация физического механизма резонансного управления материальными параметрами сегнетоэлектрического материала, предоставляющего возможность изменения диэлектрической проницаемости под воздействием электрических полей с не высокими значениями напряженностей. Показано, что способ резонансного изменения диэлектрической проницаемости сегнетоэлектрического материала является энергетически эффективным (сравнительно с традиционными методами поляризации сегнетоэлектрических материалов), что может найти применение в разработке материалов и устройств электродинамики.

Ключевые слова: сегнетоэлектрики, доменная стенка, поляризация, диэлектрическая проницаемость, высокочастотное поле, резонансное управление.

Введение

Электромагнитные свойства материалов могут изменяться под воздействием внешних факторов: электрических и магнитных полей, электрооптического эффекта, термических воздействий и т.д. Изучение свойств таких материалов, приобретает все большую актуальность [1]. Результаты этих исследований открывают возможности разработки аппаратуры, работающей на новых принципах взаимодействия электромагнитного излучения и веществ с изменяемыми физическими характеристиками [2]. Воздействие управляющих электромагнитных полей приводит к изменению материальных и конструктивных параметров создаваемых систем, что позволяет улучшить характеристики устройств, сконструированных на основе традиционно используемых материалов. В настоящее время актуальной тематикой исследований является разработка новых материалов, обеспечивающих появление не характерных свойств, и нашедших свое применение в различных частотных диапазонах. Одной из наиболее интересных и распространенных является электрическая технология управления, по причине широких возможностей переключения и простоты ее реализации.

Представленные результаты исследования зависимости диэлектрической проницаемости сегнетоэлектрического материала (CaTiO_3) от напряженности электрического поля с частотой колебаний доменных стенок, представляют практический интерес для технологий разработки новых композитных материалов и устройств СВЧ-электроники, управление свойствами которых может быть осуществлено при помощи внешних электрических полей [1–7]. Резонансное воздействие электрического поля, приводящее к изменению диэлектрической проницаемости сегнетоэлектриков, имеет важное значение для разработки новых энергетически эффективных электрических способов управления параметрами материалов и устройств.

Материалы исследования

В отсутствие внешнего электрического поля сегнетоэлектрик имеет произвольную спонтанную поляризацию, но разбит на отдельные области, так называемые области Вейсса (домены). Каждая из областей поляризована, но в сумме

поляризация всех областей равна нулю, так как электрический момент одних областей нейтрализуется действием других, с противоположно направленной поляризацией. Электрическое поле заставляет сегнетоэлектрические домены, ориентированные хаотично, приобретать одинаковую ориентацию, при этом с ростом напряженности поля поляризация достигает насыщения. В процессе поляризации происходит зарождение доменов, их разрастание и слияние. Для осуществления влияния на протекание данного процесса необходимо воздействие внешнего высокочастотного электрического поля, в котором поляризация материала с исходной полидоменной структурой осуществляется дополнительно за счет колебаний существующих доменных стенок около их начальных положений. Движение доменных стенок под действием электрического поля обуславливает поляризационные свойства сегнетоэлектриков в высокочастотном диапазоне и, как следствие, изменение его диэлектрической проницаемости [4, 6–7].

В суммарную поляризацию сегнетоэлектриков вносят вклад различные механизмы поляризации, причем для каждого из них характерен свой диапазон частот и характер зависимости от частоты, обусловленные физической природой взаимодействия. Влияние оказывают такие факторы как: температуры фазового перехода и кристаллизации, поляризуемость во внешних полях, диэлектрическая проницаемость, тангенс угла диэлектрических потерь и др. С учетом указанных факторов, для проведения исследования выбран сегнетоэлектрический материал на основе (CaTiO₃) в виде керамики [4, 7].

Физическое обоснование резонансного управления диэлектрической проницаемостью сегнетоэлектрика на стадии переполаризации и результаты экспериментального исследования

Управление диэлектрической проницаемостью материала с помощью электрического поля возможно на стадии переполаризации сегнетоэлектрика. В области температур ниже критических значений термодинамический потенциал сегнетоэлектрика находящегося в электрическом поле сводится к уравнению, связывающему напряженность поля и поляризацию (1) [4, 6].

$$2a_T(T - T_C)P_z + 4b_t P_z^3 = E_z, \quad (1)$$

где a_T и b_T – коэффициенты разложения термодинамического потенциала в ряд по степеням, P_z – z -компоненты вектора поляризации, T_C – температура Кюри, E_z – z -компонента электрического поля.

Сегнетоэлектрические материалы на стадии переполаризации проходят определенные стадии эволюции доменной структуры под действием внешнего электрического поля. Начальным является процесс зарождения доменов новой фазы, при этом основным параметром для появления зародышей переполаризации является совершение минимальной работы полем для образования зародышей критического размера, имеющих возможность дальнейшего разрастания. Работа по образованию зародыша критического размера R_{min} в постоянном поле описывается представленным уравнением (2) [6]:

$$R_{min}(n_c) = (\pi H V_{яч})^{\frac{1}{2}} \sigma_c n_c^{\frac{1}{2}}, \quad (2)$$

где n_c – число структурных элементов в критическом зародыше переполаризации, H – высота домена, $V_{яч}$ – объем элементарной ячейки кристалла, σ_c – поверхностное натяжение доменной стенки.

При воздействии переменного поля необходимо учитывать собственную частоту колебаний доменных стенок, так как это обуславливает возникновение вынужденных резонансных колебаний в материале [6]. С учетом работы возмущающей силы при

вынужденных резонансных колебаниях и работы поля на перемещение доменной стенки было получено уравнение для напряженности переменного поля E в материале (с учетом частот колебаний его и доменной стенки), а также выражение для работы поля R_{min} , необходимых для образования зародыша критического размера (3) и (4).

$$E = -\frac{1}{2} \frac{E_0^2 \rho V_{CT} \Omega 2\pi \sqrt{\frac{m_{CT}}{k}} \sin \varphi_0}{r_{дом} m_{CT} \sqrt{(\omega_0^2 - \Omega^2)^2 + 4\beta_{3AT}^2 \Omega^2}}, \quad (3)$$

где E_0 – напряженность воздействующего поля, ρ – объемная плотность заряда доменной стенки, V_{CT} – объем доменной стенки, m_{CT} – масса доменной стенки, Ω – циклическая частота возмущающей силы, k – коэффициент упругости, $r_{дом}$ – радиус домена, φ_0 – сдвиг фаз между смещением и возмущающей силой, ω_0 – собственная частота колебаний системы, β_{3AT} – коэффициент затухания.

$$R_{min}(n_c) = \frac{\pi H V_{ЯЧ} \sigma_c^2}{2P_{zi}} \left(\frac{-2r_{дом} m_{CT} \sqrt{(\omega_0^2 - \Omega^2)^2 + 4\beta_{3AT}^2 \Omega^2}}{E_0^2 \rho V_{CT} \Omega 2\pi \sqrt{\frac{m_{CT}}{k}} \sin \varphi_0} \right), \quad (4)$$

Значение диэлектрической проницаемости на стадии переполяризации может быть получено из системы уравнений: термодинамического потенциала и зависимости поляризации от напряженности поля (5), (6), (7):

$$\varepsilon = 1 + \frac{4\pi}{E} \left(\sqrt[3]{\frac{E}{2b_p} + \sqrt{\frac{E^2}{4b_p^2} - \frac{a_p^3}{27b_p^3}}} + \sqrt[3]{\frac{E}{2b} - \sqrt{\frac{E^2}{4b_p^2} - \frac{a_p^3}{27b_p^3}}} \right), \quad (5)$$

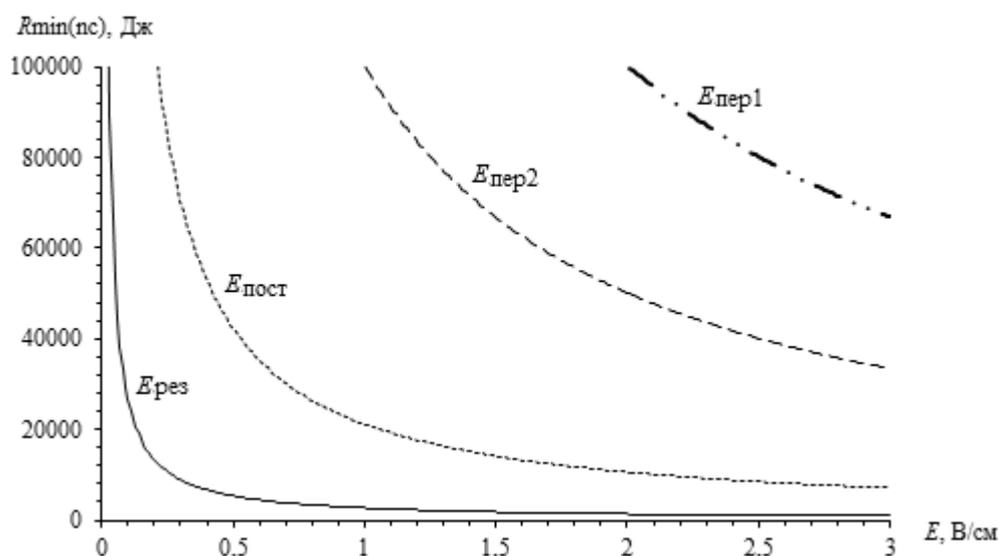
$$a_p = -2a_T(T - T_c), \quad (6)$$

$$b_p = 4b_T, \quad (7)$$

где ε – диэлектрическая проницаемость, E – напряженность поля в материале с учетом резонансного воздействия, T_c – температура Кюри, T – температура.

Зависимость работы образования зародыша переполяризации критического размера от напряженности для постоянного, переменного и резонансного электрических ВЧ-полей приведена на рис. 1. Математическая оценка значений величины работы поля для образования критических зародышей переполяризации на резонансной частоте показывает уменьшение необходимой напряженности в 10^3 раз.

На основе результатов экспериментального исследования изменения диэлектрической проницаемости композитного образца в высокочастотном диапазоне [3], проведено измерение зависимости диэлектрической проницаемости сегнетоэлектрика в ВЧ-диапазоне от напряженности приложенного управляющего электрического поля на резонансной частоте материала 60 МГц. Измерения проводились мостовым методом. Расчетные значения и результаты экспериментального исследования измерений диэлектрической проницаемости при условии резонансного воздействия ВЧ-поля представлено на рис. 2.



$R_{min}(nc)$ – работа поля, $E_{пост}$ – напряженность постоянного поля,
 $E_{рез}$ – напряженность переменного поля с резонансной частотой (60 МГц),
 $E_{пер1}$ и $E_{пер2}$ – напряженность переменного поля с частотой ниже и выше резонансной

Рис. 1. – Зависимость работы образования зародыша критического размера от напряженности поля.

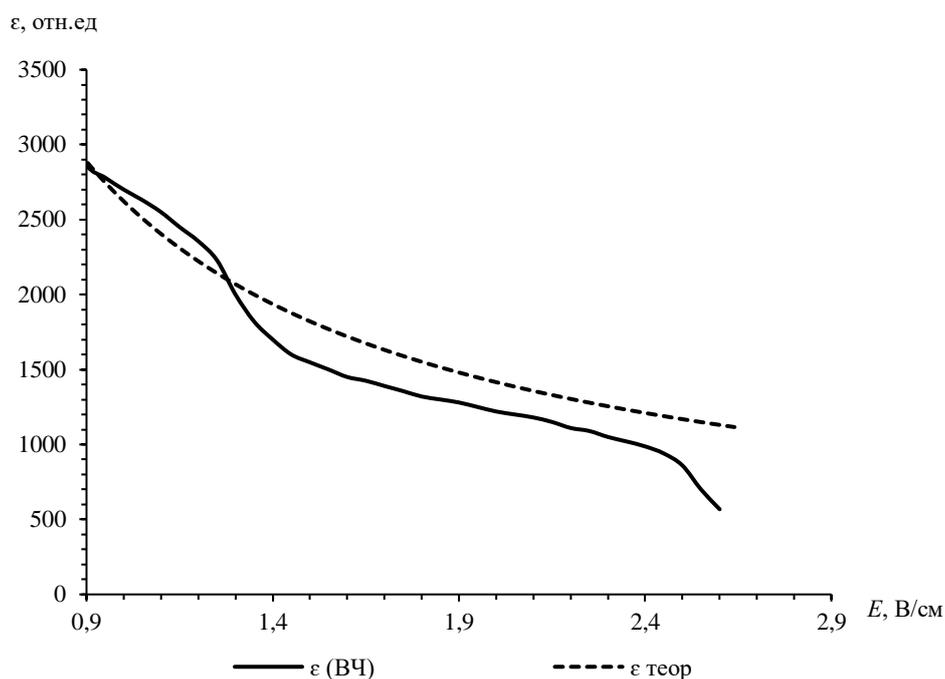


Рис. 2. – Расчетные значения ϵ (теор) и результаты экспериментальных измерений ϵ (ВЧ) диэлектрической проницаемости ϵ при условии резонансного воздействия ВЧ-поля.

При размещении в измерительной ячейке исследуемого сегнетоэлектрика и изменении напряженности ВЧ-поля до 0,9 В/см значение диэлектрической проницаемости материала максимально, а при дальнейшем увеличении напряженности уменьшается.

Заключение

Для эффективной поляризации и переполяризации материалов со строением кристаллической решетки подобным CaTiO_3 , согласно принятым нормам, требуется воздействие поля с напряженностями порядка кВ/см и более [1, 4–7]. Полученная по результатам исследования зависимость диэлектрической проницаемости данного материала от напряженности поляризирующего электрического поля со значениями до 2,6 В/см на резонансной частоте материала 60 МГц демонстрирует энергетическую эффективность резонансного управляющего воздействия.

Литература

1. Fan K., Padilla W. J. Dynamic electromagnetic metamaterials. *Materials Today*. 2014. Vol. 18, No. 1. P. 39–50.
2. Pacheco-Pena V., Engheta N. Effective medium concept in temporal metamaterials. *Nanophotonics*. 2020. Vol. 9, No. 2. P. 379–391.
3. Заерко Д. В., Гайда Л. С., Свистун А. Ч., Калоша Л. А. Использование высококачественного резонанса сегнетоэлектрических материалов для управления характеристиками рассеяния СВЧ-излучения. *Журн. Белорус. гос. ун-та. Физика*. 2017. № 3. С. 65–72.
4. Физика активных диэлектриков. Под ред. В. П. Сахненко. Ростов н/Д., 2009.
5. Оптические волны в кристаллах. Под ред. И. Н. Сисакяна. М., 1987.
6. Сидоркин А. С., Доменная структура и процессы переключения в сегнетоэлектриках. *Соросовский образовательный журнал*. 1999. № 8. С. 103–109.
7. Ch. Yuan-Bin, Improved high Q value of $\text{MgTiO}_3\text{--CaTiO}_3$ microwave dielectric resonator using WO_3 -doped at lower sintering temperature for microwave applications. *Journal of Alloys and Compounds*. 2009. Vol. 478, No. 1. P. 657–660.

Application of the resonance properties of the domain structure of ferroelectric materials for energetically efficient control of their dielectric constant

D. V Zaerko, L. A. Kalosha, L. S. Gaida

Yanka Kupala State University of Grodno, Belarus; e-mail: d.zaerko@grsu.by

The paper presents the dependences of the dielectric constant of a ferroelectric material on the strength of the acting high-frequency electric field at the oscillation frequency of the domain walls, obtained as a result of numerical and experimental investigations. An interpretation of the physical mechanism of resonant management of material parameters of a ferroelectric material is given, which makes it possible to change the dielectric constant under the influence of electric fields with low strength values. It is shown that the method of resonant change in the dielectric constant of a ferroelectric material is energetically efficient (in comparison with traditional methods of polarization of ferroelectric materials), which can find application in the development of materials and electrodynamic devices.

Key words: ferroelectrics, domain wall, polarization, the dielectric constant, high frequency field, resonant control.