

Фликкер-шум во временных зависимостях силы тока при поляризации сегнетоэлектриков

Л.В. Жога, В.В. Коренева, П.А. Бакулин, В.В. Жога

Волгоградский государственный технический университет

Аннотация: в настоящей работе проведено компьютерное моделирование равновесного поляризационного шума в сегнетоэлектрике в рамках двухмерной модели Ишибаши для случая вкладов пристеночных и внутридоменных областей. Рассматривались различные конфигурации влияния теплового шума. Проведен анализ выявленного фликкер-шума в смоделированных временных зависимостях силы тока.

Ключевые слова: моделирование, ток поляризации, доменная стенка, шум, модель Ишибаши, внутридоменная область, пристеночная область.

Введение

Эффективность традиционных методов функциональной диагностики сегнетоэлектрических компонентов [1,2] снижается в частности из-за высокой стоимости оборудования, что делает актуальным разработку таких методик исследования свойств сегнетоэлектриков, которые позволяют проводить исследования в «отсутствии» внешнего электрического поля.

«Метод тепловых шумов» является одним из методов, позволяющих изучать диэлектрические свойства сегнетоэлектриков по их воздействию на плотность шума, который зависит в основном от температуры электрической цепи. Так, пьезоэлектрические резонансы, также дающие вклад в суммарный шумовой сигнал, впервые были обнаружены и исследованы методом тепловых шумов [3]. Действующее напряжение подобных шумов определяется из теории, построенной Найквистом, позволяющей находить спектральные плотности флуктуации тока или э.д.с. в квазистационарных электрических цепях [4].

Исследование динамического хаоса в реальных системах является одним из актуальных направлений развития в современной физике. В сегнетоэлектриках динамический хаос в основном проявляется в скачках Баркгаузена [5]. Как показали дальнейшие исследования, такое поведение

сегнетоэлектриков по большей части определяется фрактальной структурой доменных границ, кинетика которых приводит к фликкер-шуму [6,7].

Для сегнетоэлектриков существенной чертой структуры является разбиение их на домены при температурах ниже температуры Кюри. Поэтому можно ожидать, что особенности такой структуры будут сказываться и на поведении тепловых шумов в таких веществах. Естественно ожидать, что поведение поляризационных шумов внутри доменной области, вдали от доменных границ, будет схоже с поведением в полярных диэлектриках. В пристеночной доменной области, где происходит переход спонтанной поляризации от одной ориентации к противоположной, поведение поляризационных шумов будет отлично. Поэтому целесообразно исследовать отдельно вклады в поляризационный шум во внутримонодоменных областях и пристеночных областях.

Модель изменения поляризации сегнетоэлектрика.

В настоящей работе проведено компьютерное моделирование в рамках двумерной модели Ишибаши [8]. Сегнетоэлектрики представляют в виде системы двумерной решетки, включающей $M \times N$ диполей. В случае исследования пристеночных шумов, половина из них ориентированы в положительном направлении, и другая половина в отрицательном. При исследовании внутримонодоменных шумов все диполи были ориентированы в одном направлении [9]. Полная внутренняя энергия этой системы определяется уравнением (1):

$$U(p) = \sum_{m,n}^{M,N} \left\{ \frac{\alpha}{2} p_{m,n}^2 + \frac{\beta}{4} p_{m,n}^4 + \frac{k_1}{2} (p_{m,n} - p_{m-1,n})^2 + \frac{k_2}{2} (p_{m,n} - p_{m,n-1})^2 + \frac{k_3}{2} [(p_{m,n} - p_{m-1,n+1})^2 + (p_{m,n} - p_{m-1,n-1})^2] \right\}, \quad (1)$$

где $M=N=50$, $p_{m,n}$ – дипольный момент в узле решетки (m, n) , k_1 , k_2 и k_3 – коэффициенты взаимодействия между соседними дипольными моментами, α – функция температуры, выраженная как

$$\alpha = a(T - T_0), \quad a > 0, \quad (2)$$

где T_0 – температура Кюри; α , β – постоянные коэффициенты, в сегнетоэлектрической фазе принимающие значения $\alpha < 0$, $\beta > 0$.

Равновесное значение параметра порядка p_0 (в нашем случае поляризации), при любой температуре выше или ниже T_0 , определяется из условия минимальности функциональной зависимости $U(p)$:

$$\left(\frac{\partial U}{\partial p} \right)_{p_0} = (a(T - T_0)p + \beta p^3) = 0, \quad \left(\frac{\partial^2 U}{\partial p^2} \right)_{p_0} > 0, \quad (3)$$

откуда

$$P = 0, \text{ при } T > T_0 \quad (4.1)$$

$$P_s = \pm \left(\frac{a(T - T_0)}{\beta} \right)^{1/2} \text{ при } T < T_0, \quad (4.2)$$

где P_s – спонтанная поляризация [10].

Проводилось компьютерное моделирование временной зависимости поляризации сегнетоэлектриков путем релаксации к ее равновесной конфигурации. Временную эволюцию изменения $p(t)$ можно получить из уравнения Ландау-Халатникова [11] (5)

$$\gamma \frac{dp}{dt} = - \frac{\partial U}{\partial p}, \quad (5)$$

где γ – коэффициент вязкости. Значения поляризации получаются путем подстановки $U(p)$ из уравнения (1) в уравнение (5), одновременного решения множества нелинейных нормальных уравнений.

Задается тепловой шум, определяемый уравнением (6)

$$\Delta T(t) = \frac{A}{n} \sum_{i=1}^n \sin(i\omega_1 t + \varphi_i) \quad (6)$$

где n – количество гармоник, ω_0 – первая гармоника, φ_i – набор из случайных величин, распределенных равномерно на интервале $\left[-\frac{\pi}{2}; \frac{\pi}{2}\right]$.

Тогда функция температуры α будут включать в себя тепловой шум:

$$\alpha = a(T - T_0 + \Delta T(t)) \quad (7)$$

Рассматривались различные конфигурации влияния теплового шума. Для каждой из таких конфигураций решали уравнение Ландау-Халатникова (5) с учетом теплового шума. Усреднив рассчитанные значения поляризации, получили зависимость силы тока поляризации от времени $i(t)$ для пристеночной (рис. 1а) и внутридоменной (рис. 1б) областей.

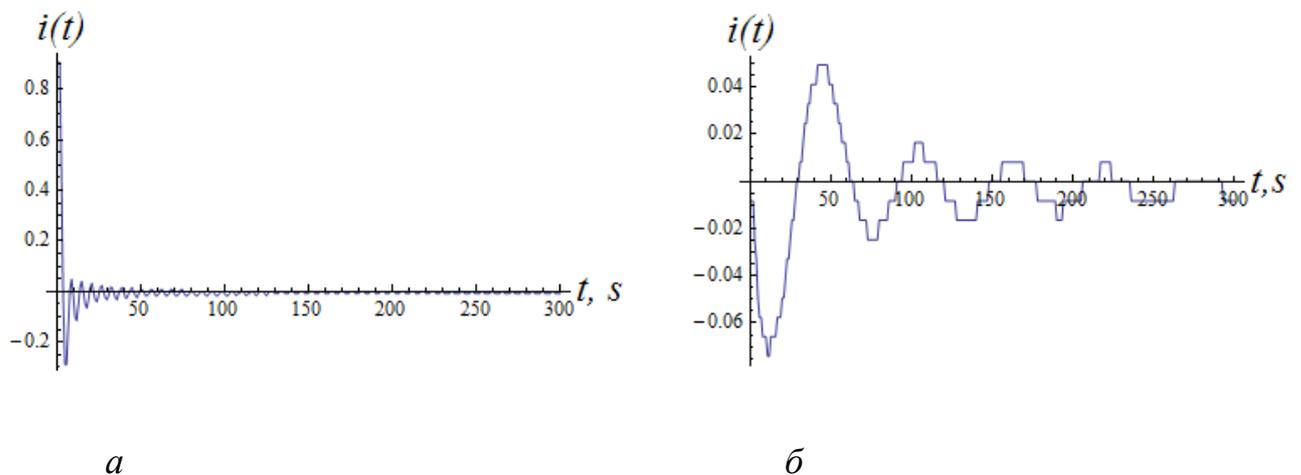


Рис. 1. График нормированных значений зависимости тока поляризации $i(t)$ от времени с учетом теплового шума $\Delta T(t)$ для пристеночной (а) и внутридоменной (б) областей

В смоделированных зависимостях силы тока от времени обнаружен фликкер-шум. Анализ выявленного шума проводился с помощью функций спектра мощности $S(\nu)$ и разностных моментов [12]:

$$\Phi^{(p)}(\tau) = \left\langle [i(t) - i(t + \tau)]^p \right\rangle \quad (8)$$

где $i(t)$ – временная зависимость силы тока, τ - интервал длительности, p – порядок разностного момента.

Характер зависимостей $\Phi^{(p)}(\tau)$ и $S(\nu)$ для «стационарных» процессов может быть представлен следующим образом:

$$\Phi^{(2)}(\tau) \rightarrow \begin{cases} \tau^{2H_1}, & \text{если } \tau \ll T_1, \\ \sigma^2 \langle p^2 \rangle - \langle p \rangle^2 & \\ 2\sigma^2, & \text{если } \tau \gg T_1, \end{cases} \quad (9)$$

где T_1 – определяемое из $\Phi^{(2)}(\tau)$ «время корреляции» для внутридоменной (рис. 2а) и пристеночной (рис. 2б), параметр H_1 – константа Херста [10], σ^2 - среднеквадратическое отклонение измеряемой величины (рис. 2).

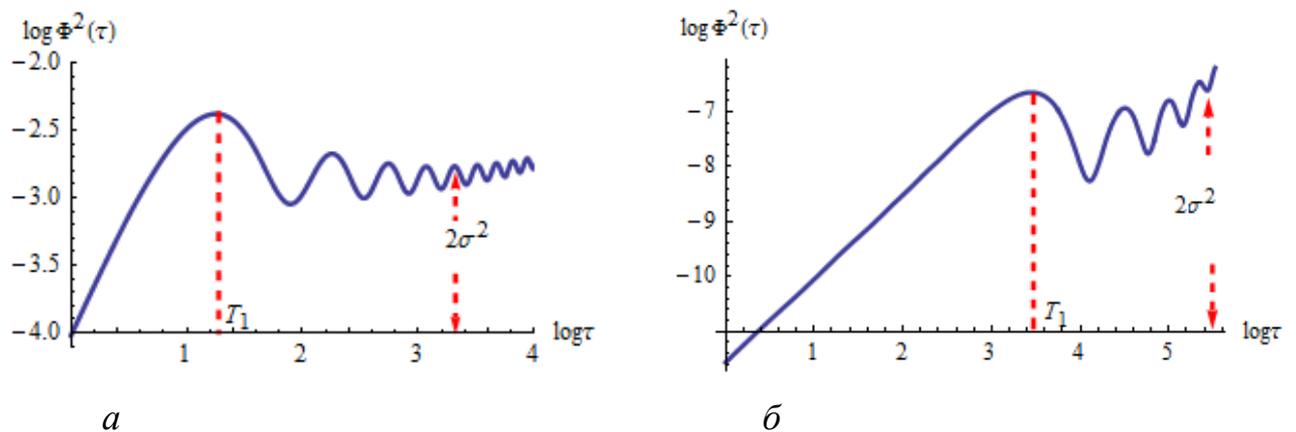


Рис. 2. График зависимости разностных моментов $\Phi^{(p)}(\tau)$ для пристеночной (а) и внутридоменной (б) областей

С помощью быстрого преобразования Фурье для зависимости $\Phi^{(2)}(\tau)$ получен спектр поляризационного шума $S(\nu)$ (рис. 4).

$$S(\nu) \rightarrow \begin{cases} 1/\nu^n, & \text{если } \nu \gg \nu_0 \\ S(0), & \text{если } \nu \ll \nu_0 \end{cases} \quad (10)$$

Здесь $\nu_0 \equiv 1/(2\pi T_0)$; T_0 – определяемое из $S(\nu)$ «время корреляции»; n и $S(0)$ – параметры.

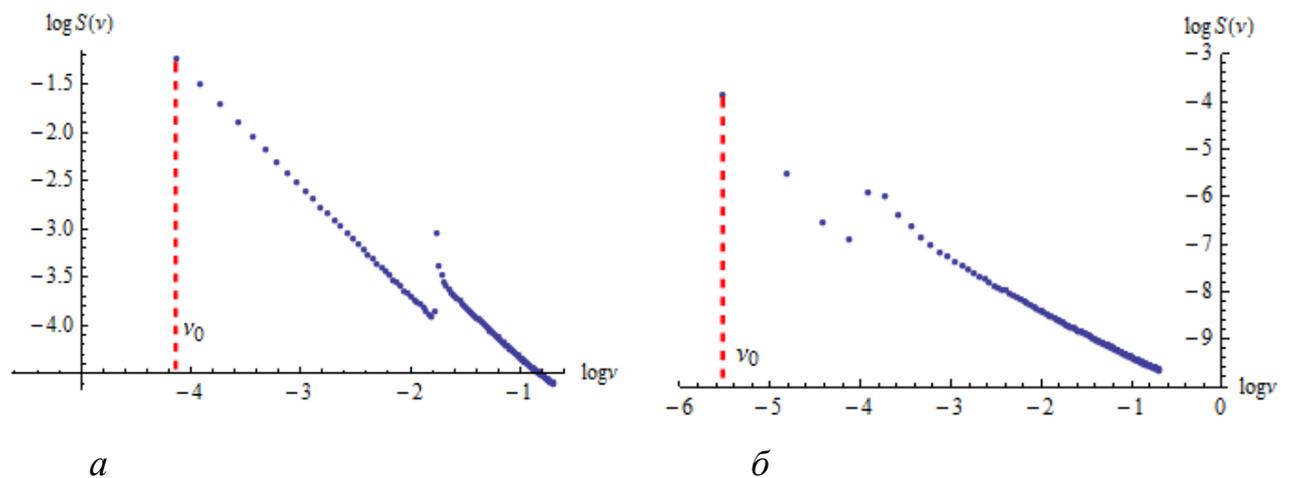


Рис. 3. График зависимости спектра мощности $S(\nu)$ для пристеночной (а) и внутридоменной (б) областей

В результате анализируются: T_l – характерное время, на котором измеряемое значение $i(t)$ «забывается»; H_l – показывает по какому закону теряется взаимосвязь измеряемых в разные моменты времени величин; σ^2 – дисперсия; T_0 – некоторое характерное время, в пределах которого реализуется взаимосвязь измеряемой динамической переменной; n – безразмерный параметр [11]. Данные параметры характеризуют хаотическую составляющую сигнала $i(t)$.

В таблице 1 представлены значения параметров, характеризующих хаотическую составляющую сигнала $i(t)$ для внутридоменной и пристеночных областей:

Таблица 1.

Параметры хаотической составляющей сигнала

	T_l	H_l	T_0	σ^2	n
Внутридоменная	3,51	1,56	0,045	1,637	1,05
Пристеночная	1,38	1,35	0,028	0,79	0,96

Заключение

В результате анализа зависимостей поляризационных шумов

внутридоменной и пристеночной областях выявлено:

1. Время корреляции во внутридоменной области более чем в два раза больше чем в пристеночной;
2. Значение константы Херста для внутридоменных и пристеночных областей приблизительно равны
3. Дисперсия поляризационных шумов во внутридоменной области более чем в два раза больше чем в пристеночной;
4. Показатель степени фликкер-шума приблизительно равен единице как для внутридоменной, так и для пристеночной областей.

Различие поведения поляризационных шумов во внутридоменных и пристеночных областях обусловлено структурным различием этих областей.

Благодарности

Авторы выражают благодарность к.ф.-м.н. Нестерову В.Н. за участие в обсуждении работы.

Литература

1. Земляков В.Л., Ключников С.Н. Контроль электроакустических пьезопреобразователей акустических антенных решеток по электрическим измерениям. Инженерный вестник Дона. 2016. №1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/N3y2017/4295.
2. Фиговский О. Л., Нанотехнологии для новых материалов // Инженерный вестник Дона, 2012, №3 URL: ivdon.ru/magazine/archive/n3y2012/1048.
3. Бедняков П.С., Шнайдштейн И.В., Струков Б.А. Исследование диэлектрических свойств монокристаллов $BaTiO_3$ разного качества методом тепловых шумов // Физика твердого тела. 2011. Т. 53. №2. С. 328-335.
4. Nyquist H. Thermal Agitation of Electric Charge in Conductors // Phys. Rev. 1928. 32. pp. 110–113.

5. Рудяк В.М. Эффект Баркгаузена // Успехи физических наук. 1970. Т. 101. В. 7. С. 429-462.
 6. Шур В.Я., Кожевников В.Л., Пелегов Д.В., Иванов Р.К. Формирование и движение фрактальных доменных стенок в сегнетоэлектриках // Вестник ВГТУ. Сер. Материаловедение. 2000. В.1.8. С. 36-45.
 7. Жога Л.В., Дмитрук М.И., Габриэлян А.В., Жога И.Л., Захаров К.А. Релаксация в поликристаллической сегнетокерамике при одновременном действии механических напряжений и электрического поля // Известия Российской академии наук. Серия физическая. 2011. Т.75. №10. С.1479-1483
 8. Omura M., Adachi H., Ishibashi Y. Simulations of Polarization Reversals by a Two-Dimensional Lattice Model // Jpn. J. Appl. Phys. 1992. Т. 31. pp. 3238-3241.
 9. Жога Л.В., Жога В.В., Терех В.В., Нестеров В.Н., Габриэлян А.В. Исследование токов поляризации при одновременном действии электрического поля и механических напряжений в сегнетокерамике методом компьютерного моделирования движения доменных стенок // Электромагнитные волны и электронные системы. 2012. № 8. С. 67-72.
 10. Струков Б.А. Фазовые переходы в сегнетоэлектрических кристаллах с дефектами // Соросовский образовательный журнал. 1996. №12. С. 95-101.
 11. Ландау Л.Д., Халатников И.М. Об аномальном поглощении звука вблизи точек фазового перехода второго рода // ДАН СССР. 1954. №96. С. 469-472.
 12. Жога В.В., Жога Л.В., Нестеров В.Н., Терех В.В., Дмитрук М.И. Исследование скачков случайного характера, возникающих при электромеханическом нагружении сегнетокерамики // Нелинейный мир. 2012. № 9. С. 585-590.
-

References

1. Ivanov I.I., Zemljakov V.L., Kljuchnikov S.N. Inzhenernyj vestnik Dona (Rus), 2016. №1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/N3y2017/4295.
2. Figovskij O. L., Inzhenernyj vestnik Dona (Rus), 2012, №3. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n3y2012/1048.
3. Bednjakov P.S., Shnajdshtejn I.V., Strukov B.A. Fizika tverdogo tela. 2011. T. 53. №2. pp. 328-335.
4. Nyquist H. Phys. Rev. 1928. 32. pp. 110–113.
5. Rudjak V.M. Uspehi fizicheskikh nauk. 1970. T. 101. V. 7. pp. 429-462.
6. Shur V.Ja., Kozhevnikov V.L., Pelegov D.V., Ivanov R.K. Vestnik VGTU. Ser. Materialovedenie. 2000. V.1.8. pp. 36-45.
7. Zhoga L.V., Dmitruk M.I., Gabrijeljan A.V., Zhoga I.L., Zaharov K.A. Izvestija Rossijskoj akademii nauk. Serija fizicheskaja. 2011. T.75. №10. pp.1479-1483
8. Omura M., Adachi H., Ishibashi Y. Jpn. J. Appl. Phys. 1992. T. 31. pp. 3238-3241.
9. Zhoga L.V., Zhoga V.V., Tereh V.V., Nesterov V.N., Gabrijeljan A.V. Jelektromagnitnye volny i jelektronnye sistemy. 2012. № 8. pp. 67-72.
10. Strukov B.A. Sorosovskij obrazovatel'nyj zhurnal. 1996. №12. pp. 95-101.
11. Landau L.D., Halatnikov I.M. DAN SSSR. 1954. №96. pp. 469-472.
12. Zhoga V.V., Zhoga L.V., Nesterov V.N., Tereh V.V., Dmitruk M.I. Nelinejnyj mir. 2012. № 9. pp. 585-590.