

**Н. Д. САХНЕНКО**, д-р техн. наук, проф., НТУ «ХПИ»;  
**О. Л. РЕЗИНКИН**, канд. техн. наук, с.н.с. НТУ «ХПИ»;  
**М. В. ВЕДЬ**, д-р техн. наук, проф., НТУ «ХПИ»;  
**Н. Н. ПРОСКУРИН**, асп., НТУ «ХПИ»;  
**В. И. РЕВУЦКИЙ**, асп., НТУ «ХПИ»

## **ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВ СЛОИСТЫХ МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ**

Исследованы свойства слоистого сегнето-магнитного покрытия. Сделаны выводы о возможности использования выбранного слоистого покрытия в качестве рабочей среды для формирования ударной электромагнитной волны (УЭМВ).

**Ключевые слова:** генераторы импульсов, формирующие линии, активный диэлектрик, ударные волны.

**Введение.** Одним из возможных путей получения мощных электромагнитных импульсов с малым временем нарастания является использование формирующих устройств на основе нелинейных линий передачи. В качестве активной среды данных нелинейных формирующих линий могут быть использованы ферромагнитные среды [1]. Волновые системы на основе линий с ферритовым заполнением, обладающие малыми потерями и нелинейными свойствами, работают при сравнительно слабых полях в весьма широком диапазоне частот [2]. Недостатком линий с нелинейной магнитной проницаемостью ( $\mu$ ) является высокое волновое сопротивление, обусловленное большими значениями магнитной проницаемости ферромагнетиков. В схемах наносекундного диапазона нелинейные элементы используются, главным образом, как элементы, формирующие волны с крутыми перепадами из сформированных генератором исходных импульсов волн с относительно медленно нарастающим фронтом.

Генерация мощных электромагнитных импульсов с коротким временем нарастания возможна и в средах с нелинейными электрическими параметрами, так как при распространении электромагнитных волн в средах с нелинейной диэлектрической проницаемостью ( $\epsilon$ ) при определенном соотношении электрофизических параметров также возникают ударные электромагнитные волны (УЭМВ).

**Анализ публикаций.** Активные диэлектрики широко используются во многих областях современной техники: радиотехнике, электроакустике, квантовой и измерительной электронике [3]. Данные материалы применяются для изготовления малогабаритных конденсаторов, пьезоэлементов, нелинейных емкостных элементов, параметрических

© М. Д. Сахненко, О. Л. Резинкин, М. В. Веды, М. М. Проскурин, В. И. Ревуцкий, 2013

генераторов, для стабилизации частоты, в фильтрах, термометрах, модуляторах, умножителях частоты. Изменение диэлектрической проницаемости и, следовательно, емкости сегнетоэлектриков с температурой используется для измерения температуры.

В других устройствах, например, в ультразвуковых детекторах, тензометрах, микрофонах, и устройствах для измерения вибраций, активные диэлектрики предназначены для преобразования малых механических смещений в электрические сигналы.

Для того, чтобы использовать максимальные значения пьезоэлектрических коэффициентов, необходимо поддерживать температуру сегнетоэлектрика постоянной с высокой точностью. Это не всегда достижимо, особенно в тех случаях, когда устройства на основе сегнетоэлектрических керамик работают в высокочастотных электрических полях, и несоблюдение температурного режима может привести к значительным поляризационным потерям, поэтому возникает необходимость в создании таких веществ, которые обладают требуемыми свойствами при комнатной температуре, либо близкой к ней.

**Постановка задачи.** Синтез активных диэлектриков с заданными электрофизическими характеристиками посредством изменения состава твердых растворов. Воздействие на характеристики активных диэлектриков путем введения определенных добавок в процессе изготовления нелинейных материалов.

**Материалы исследований.** Одним из опробованных химических составов является титанат бария – стронция, допированный цирконием ( $Ba_{0,8} Sr_{0,2} Ti_{0,95} Zr_{0,05} O_3$ ). Созданию опытных образцов из керамического материала предшествовало физическое моделирование формирующей линии.

На рис. 1 показаны осциллограммы напряжения, зарегистрированные в физической модели линии.

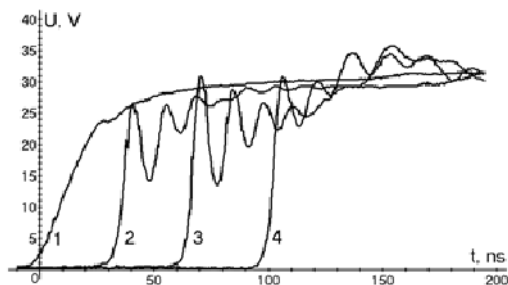


Рисунок 1 – Осциллограммы напряжения, зарегистрированные в физической модели линии

Общим недостатком, присущим как линиям на нелинейной  $\mu$ , так и линиям на нелинейной  $\epsilon$ , является изменение волнового сопротивления

линии при прохождении по ней электромагнитной волны, делающее полное согласование источника на УЭМВ с постоянной омической нагрузкой невозможным. Данная проблема может быть решена при использовании для формирования УЭМВ среды, в которой изменение  $\epsilon$  и  $\mu$  будет происходить одновременно и синхронно, так, чтобы отношение  $\mu/\epsilon$  оставалось близким к постоянному (рис. 2, 3). Для такой изоимпедансной среды волновое сопротивление в процессе формирования УЭМВ будет иметь фиксированное значение [4].

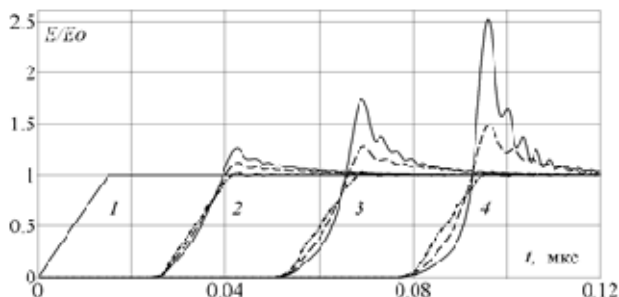


Рисунок 2 – Результаты расчета напряженности электрического поля электромагнитной волны, распространяющейся по линии: 1 – исходный импульс ( $Z=0$ ); 2 –  $Z=0,2 \cdot Z_{\max}$ ; 3 –  $Z=0,4 \cdot Z_{\max}$ ; 4 –  $Z=0,6 \cdot Z_{\max}$

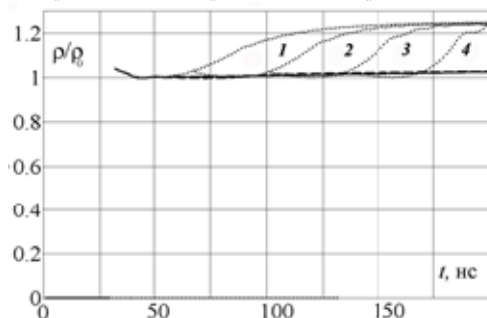


Рисунок 3 – Результаты расчета волнового сопротивления ЛП при распространении в ней электромагнитной волны: 1 –  $Z=0,2 \cdot Z_{\max}$ ; 2 –  $Z=0,4 \cdot Z_{\max}$ ; 3 –  $Z=0,5 \cdot Z_{\max}$ ; 4 –  $Z=0,6 \cdot Z_{\max}$ , где  $Z_{\max}$  - длина линии передачи

Предварительные расчеты и эксперименты со статистическими смесями диспергированных сегнетокерамик и ферритов с полимерными наполнителями и без наполнителей показали, что практически необходимое процентное содержание ферромагнитной составляющей в этих смесях таково, что смесь теряет электрическую прочность при меньших значениях напряжения на электродах формирующей линии, чем те, при которых

достигается уровень электрического поля, необходимый для проявления нелинейных свойств сегнетоэлектрической составляющей. Возможным вариантом реализации процесса обострения фронта импульса, за счет УЭМВ, в такой системе рассматривается применение слоистой сегнето - магнитной среды, экспериментальный подбор оптимального материала и синтез которой обусловили цель данной работы.

В качестве материала для нанесения покрытий использовали сплавы алюминия, в виде пластинок размером  $10 \times 10$  мм. Дисперсными материалами служили порошки феррита ( $Zn Fe_2 O_4$ ) и сегнетоэлектрика ( $Ba_{0,8} Sr_{0,2} Ti_{0,95} Zr_{0,05} O_3$ ) с размером частиц 10 мкм. Магнитный слой наносили методом микродугового оксидирования из щелочного раствора, последующий диэлектрический слой – методом электрофоретического осаждения из раствора оксалатной кислоты. Для определения зависимости электрической индукции от напряженности электрического поля использовалась классическая схема Сойера-Тауэра [5], представляющая собой цепочку из последовательно включенных емкостей – образца и измерительной емкости. Регистрация напряжения проводилась цифровым двухканальным осциллографом Tektronix TDS 1012. Измерительная цепь для регистрации напряжения на образце состояла из высоковольтного делителя и пассивного пробника-делителя HP9258 (250 МГц). Посредством омического делителя проводилась регистрация напряжения на измерительной емкости.

На рис. 4 изображена измерительная ячейка стенда, верхний электрод которой выполнен в виде конуса.

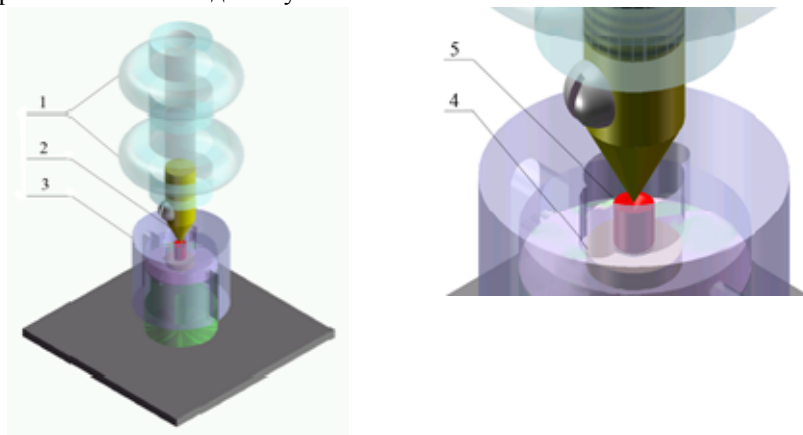


Рисунок 4 – Схема измерительного узла: 1 – изолятор (оргстекло); 2 – высоковольтный электрод; 3 – измерительная ячейка; 5 – образец (сегнето - магнитное покрытие)

Для предотвращения электрического пробоя по поверхности образца, а также снижения уровня электромагнитных помех, возникающих вследствие развития электрической короны и воздействующих на измерительные цепи экспериментального стенда, его размещали в заполненном трансформаторным маслом контейнере.

В области создания нелинейных систем большой интерес представляет исследование свойств диэлектриков в окрестности температуры фазового перехода, соответствующего превращению структуры твердого тела из сегнетоэлектрической фазы в параэлектрическую. В данном диапазоне температур наблюдается сильная нелинейность диэлектрической проницаемости при сравнительно низких диэлектрических потерях. Для поддержания требуемой температуры образцов был организован контролируемый нагрев исследуемого образца, и термостат UDS – 12.R обеспечивал возможность поддерживать температуру образца с погрешностью не более  $\pm 2^{\circ}\text{C}$ . Контейнер с образцом был снабжен системой токоподводов, термостатом и термопарным измерительным преобразователем для регистрации температуры. Таким образом, было обеспечено исследование характеристик поляризации образцов при различных температурах.

Результаты измерений с помощью цифрового осциллографа Tektronix TDS 1020 записывались в файлы, дальнейшая обработка которых проводилась с помощью редактора электронных таблиц Microsoft Excel.

**Результаты исследований.** Ранее был предложен способ формирования слоистых сегнето-магнитных покрытий [6], который включал два последовательных электрохимических процесса: микродуговое окисление и электрофоретическое осаждение. Данный способ позволяет получать плотные, равномерные по толщине осадки с высокой адгезией к металлической подложке.

По полученной зависимости диэлектрической проницаемости от температуры (рис. 5) была определена точка Кюри полученного покрытия ( $50 - 55^{\circ}\text{C}$ ), также была определена электрическая прочность, которая составила  $- 20 - 25 \text{ кВ/мм}$ .

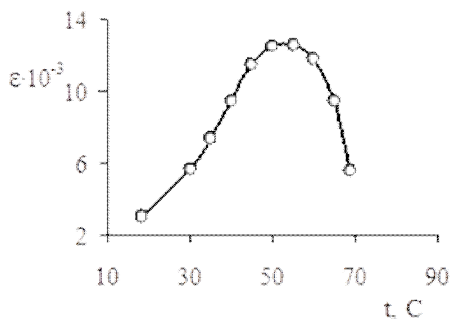


Рисунок 5 – Зависимость диэлектрической проницаемости слоистого покрытия от температуры

Методом импедансной спектроскопии были исследованы физико-химические свойства монослойных покрытий (МДО пленка, феррит, сегнетоэлектрик), а также слоистых покрытий (алюминий / феррит / сегнетоэлектрик) на образцах из сплава алюминия (А99). Результаты измерений представлены в виде зависимостей полного сопротивления от логарифма частоты – диаграммы Боде (рис. 6).

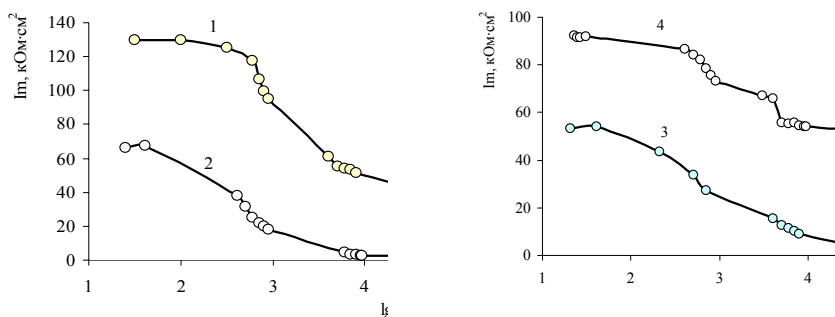


Рисунок 6 – Зависимость полного сопротивления от частоты: 1 – МДО пленка алюминия; 2 – алюминий/сегнетоэлектрик; 3 – алюминий/феррит; 4 – алюминий/феррит/сегнетоэлектрик

**Выводы.** В отличие от монослойных осадков (рис. 6, зависимость 1 - 3), слоистые покрытия (рис. 6, зависимость 4) характеризуются наличием трех плато, каждое из которых, вероятно, соответствует отклику определенного слоя покрытия, т. е. в определенной области частот происходит отклик ферромагнитной и сегнетоэлектрической составляющих. Таким образом, синтезированные слоистые среды обладают выраженными сегнето-магнитными свойствами и электрической прочностью, достаточной для их

использования в качестве активной диэлектрической среды нелинейного формирующего устройства.

**Список литературы:** 1. *Белянцев А.М.* Генерация высокочастотных колебаний фронтом ударной электромагнитной волны в связанных линиях передачи с аномальной и нормальной дисперсией / *А.М. Белянцев, А.Б. Козырев* // Журнал технической физики. – Т. 71. – №. 7. – 2001. – С. 79–82. 2. Импульсные устройства с нелинейными распределенными параметрами / *Богатырев Ю.К.* – М. : Сов. радио, 1974. 3. Сегнетоэлектрики и антисегнетоэлектрики / *Г.А. Смоленский, В.А. Боков, В.А. Исупов, и др.* – Л. : Наука, 1971. 4. *Резинкин О.Л., Резинкина М.М., Лисачук Г.В.* Численное исследование процессов образования ударной электромагнитной волны в композитной среде с синхронно изменяющимися диэлектрической и магнитной проницаемостями // Техн. электродинамика. Тем. вып. «Силовая электроника та енергоефективність». - 2012. - Ч.2. - С. 163-168. 5. *Sawyer C. B., Tower C. N.* Phys. Rev. – 1930. – 85, 269. 6. Пат. на корисну модель 66123 Україна, МПК C25D 11/00. Спосіб створення магнітоелектричних покриттів шаруватої структури / *Сахненко М.Д., Ведь М.В., Лисачук Г.В.* та ін. – у 201106713, заявл. 30.05.2011; опубл. 26.12.2011; Бюл. № 24. 7. *Резинкин О.Л., Резинкина М.М., Лисачук Г.В.* Численное моделирование процесса формирования ударных электромагнитных волн в линии передачи с нелинейным диэлектриком // Технічна електродинаміка. Тематичний випуск «Силова електроенергетика та енергоефективність». – 2007. – Ч. 3. – С. 82-85.

*Надійшла до редколегії 05.02.2013*

УДК 621.373

**Электрофизические свойства слоистых магнитоэлектрических покрытий / Н. Д. Сахненко, О. Л. Резинкин, М. В. Ведь, Н. Н. Проскурин, В. И. Ревуцкий** // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Автоматика та приладобудування. – Х. : НТУ «ХПІ», 2013. – № ( ). – С. –. – Бібліогр.: 7 назв.

Досліджені властивості шаруватого сегнето-магнітного покриття. Зроблені висновки щодо можливості використання обраного шаруватого покриття у якості робочого середовища для формування ударної електромагнітної хвилі (УЕМХ).

**Ключові слова:** генератори імпульсів, формуючі лінії, активний діелектрик, ударні хвилі.

The forming technology and the initial stages of the researching ferroelectric - ferromagnetic composite are described in this article. The obtained data allow making conclusions about the possibility of using the composite medium as a forming line base.

**Keywords:** pulsers, forming lines, active dielectric, shock waves.