

**О.Л. РЕЗИНКИН**, канд. техн. наук, зав. каф., НТУ "ХПИ",  
Харьков

## **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ИМПУЛЬСНОЙ ПОЛЯРИЗАЦИИ ОБРАЗЦОВ СЕГНЕТОКЕРАМИКИ**

Experimental researches of electrical induction and dielectric permeability dependences on electrical field intensity for ferroelectrics at the conditions of pulsed electric fields with strengths up to 4 MV/m are resulted.

Проведены экспериментальные исследования зависимости электрической индукции и диэлектрической проницаемости от напряженности электрического поля в сегнетоэлектриках в условиях приложения к ним импульсных электрических полей с напряженностью до 4 МВ/м.

Проведено експериментальні дослідження залежності електричної індукції та діелектричної проникності від напруженості електричного поля у сегнетоелектриках в умовах прикладення до них імпульсних електричних полів з напруженістю до 4 МВ/м.

**Введение.** Характерные для сегнетоэлектриков высокая диэлектрическая проницаемость, наличие диэлектрического гистерезиса, высокий пьезомодуль, особые электрооптические характеристики и ряд других необычных электрофизических свойств обуславливают их широкое использование во многих областях современной техники: радиотехнике, электроакустике, квантовой электронике и измерительной технике [1]. Диэлектрики с такими свойствами привлекают большое внимание специалистов, работающих с мощной ВЧ и СВЧ техникой, благодаря тому, что позволяют расширить возможности приборов и устройств по сравнению с приборами на основе полупроводниковых материалов и ферритов [2]. Данные материалы применяются для изготовления малогабаритных конденсаторов, пьезоэлементов, нелинейных емкостных элементов, модуляторов лазерного излучения, параметрических генераторов и т. п. Сегнетоэлектрики технологически более просты, обладают большей, чем полупроводники, электрической и радиационной стойкостью, значительно более экономичны по энергопотреблению, чем ферриты. В некоторых случаях реализация приборов на сегнетоэлектриках позволяет решить задачи техники СВЧ, не решаемые применением приборов на полупроводниках и ферритах.

Представляет большой интерес создание нелинейных волновых систем, на базе искусственных формирующих линий и длинных линий с распределенными параметрами, имеющих в качестве активной диэлектрической среды ферромагнитное и сегнетоэлектрическое заполнение [3]. На основе нелинейных волновых систем с распределенными параметрами разработаны и исследованы принципиально новые схемы различного рода устройств, в которых используются, наряду с уже хорошо известными, новые эффекты и свойства, присущие только волновым системам [3-5]. Это позволяет применять нелинейные волновые системы в качестве формирующих элементов устройств, генерирующих и преобразующих импульсные колебания начиная с микро- и заканчивая субнаносекундными диапазонами [5].

При распространении электромагнитных волн в нелинейных средах возможно формирование ударных электромагнитных волн (УЭМВ). Процесс формирования УЭМВ является нестационарным и для его адекватного описания требуется информация о свойствах диэлектрика в моменты времени, соответствующие так называемой переходной кривой поляризации. Это обуславливает необходимость экспериментального исследования импульсной поляризации образцов сегнетокерамики в импульсных электрических полях. С этой целью был создан экспериментальный стенд, позволяющий проводить исследования образцов сегнетокерамики при воздействии разовых импульсов напряжения с длительностью фронта от 5 мс до 50 нс и амплитудой 5 кВ.

**Результаты экспериментальных исследований.** Проведены исследования образцов разных сегнетокерамик (1, рис. 1.) на основе твердых растворов  $(\text{Ba}_{1-x}\text{Sr}_x)\text{TiO}_3$ , выполненных в виде таблеток диаметром 35 мм и толщиной 3-5 мм с нанесенными на их торцах электродами (2, рис. 1). Electroды на образце выполнены из токопроводящей пасты ELECTON 40АС. На краях электродов для предотвращения коронирования нанесен слой эпоксидной смолы (3, рис. 1).

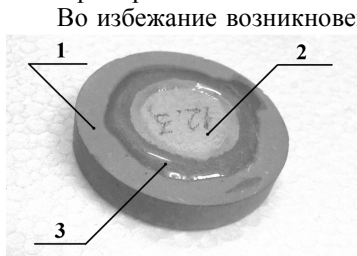


Рис. 1. Экспериментальный образец сегнетокерамики.

Во избежание возникновения электрических разрядов в порах керамики и электрического пробоя по ее поверхности, образцы подвергались вакуумной обработке в конденсаторном масле при температуре 315 К. При проведении эксперимента образцы также были погружены в осушенное конденсаторное масло.

Изменения диэлектрических свойств образцов сегнетокерамики проводились по методике Сойера –

Тауэра, модифицированной применительно к исследованию импульсной поляризации диэлектриков [6]. Данная методика основана на синхронной регистрации временных зависимостей напряженности импульсного электрического поля и электрической индукции в исследуемых диэлектрических средах.

Для проверки работоспособности созданного стенда, корректности приведенной экспериментальной методики, а также программного обеспечения, примененного при численной обработке цифровых осциллограмм, был проведен тестовый эксперимент. Вместо образца исследуемого нелинейного материала был установлен линейный высоковольтный малоиндуктивный конденсатор, в котором рабочим диэлектриком является полимерная пленка. Регистрация сигналов в каналах измерения напряженности и индукции электрического поля продемонстрировала их подобие (совпадение при наложении осциллограмм с соответствующим выбором соотношения их масштабов по Y) в пределах погрешности осциллографа Tektronix TDS1020, что свидетельствует о высокой точности регистрации измеряемых величин.

После проведения тестовых экспериментов были исследованы свойства образцов сегнетокерамик №1 ( $\text{Ba}_{0,8}\text{Sr}_{0,2}\text{TiO}_3$ ) и №2 ( $\text{Ba}_{0,75}\text{Sr}_{0,25}\text{TiO}_{0,95}\text{Zr}_{0,05}\text{O}_3$ ), полученных при разных значениях температуры. Результаты измерений с помощью цифрового осциллографа записывались в виде текстовых файлов, последующая обработка которых проводилась с помощью редактора электронных таблиц Microsoft Excel. В результате были получены зависимости электрической индукции исследуемых образцов сегнетокерамики от напряженности прикладываемого к ним электрического поля.

Расчет напряженности электрического поля  $E(t)$  и электрической индукции  $D(t)$  проводился по формулам:

$$E(t) = \frac{U_{Cx}(t)}{d}; D(t) = \frac{C_m \times U_{Cm}(t)}{S},$$

где  $U_{Cx}(t)$ ,  $U_{Cm}(t)$  – результаты осциллографирования напряжений на емкостях  $C_x$  и  $C_m$  в соответствующие моменты времени;  $d$  – толщина исследуемого образца сегнетокерамики;  $S$  – площадь электродов образца.

Для определения диэлектрической проницаемости, первичные экспериментальные данные сглаживались полиномом 15-ой степени. Зависимости дифференциальной диэлектрической проницаемости от напряженности прикладываемого электрического поля находились путем аналитического дифференцирования полученного полинома.

В результате численной обработки сигналов, зарегистрированных цифровым осциллографом, для исследуемого нелинейного диэлектрика были получены зависимости от напряженности электрического поля величин электрической индукции, а также относительной диэлектри-

ческой проницаемости:

$$\varepsilon(E) = (1/\varepsilon_0) \cdot (D/E),$$

где  $D$  – электрическая индукция;  $E$  – напряженность электрического поля и дифференциальной диэлектрической проницаемости:

$$\varepsilon_d(E) = (1/\varepsilon_0) \cdot (\partial D / \partial E).$$

Для расчетов использовались значения цифровых осциллограмм, которые соответствовали фронту импульса, взятому по уровню 0,1-0,9 от его амплитудного значения. Экспериментально полученные зависимости электрической индукции и дифференциальной диэлектрической проницаемости от напряженности приложенного электрического поля для образцов сегнетокерамик № 1 и № 2 приведены на рис. 2, 3.

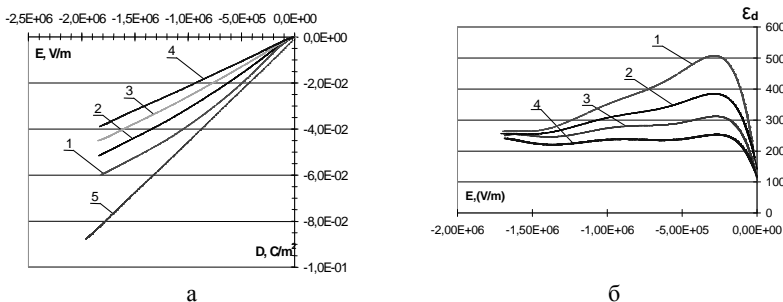


Рис. 2. Зависимости, полученные для образца №1 ( $Ba_{0,8}Sr_{0,2}TiO_3$ ): а – электрической индукции, б - дифференциальной диэлектрической проницаемости от напряженности приложенного электрического поля: 1 -  $t = 35^\circ C$ ; 2 -  $t = 45^\circ C$ ; 3 -  $t = 50^\circ C$ ; 4 -  $t = 55^\circ C$ ; 5 -  $t = 60^\circ C$ .

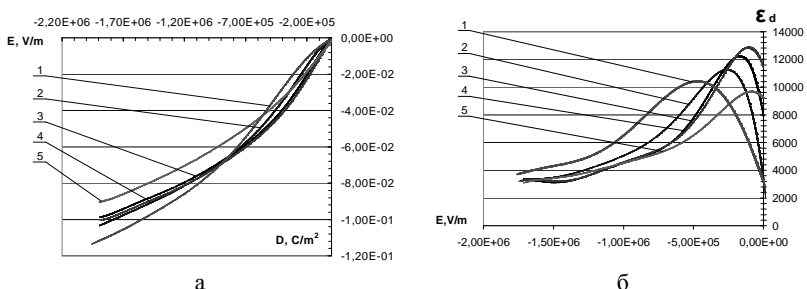


Рис. 3. Зависимости, полученные для образца №2 ( $Ba_{0,75}Sr_{0,25}TiO_{0,95}Zr_{0,05}O_3$ ): а – электрической индукции, б - дифференциальной диэлектрической проницаемости от напряженности приложенного электрического поля: 1 -  $t = 35^\circ C$ ; 2 -  $t = 45^\circ C$ ; 3 -  $t = 50^\circ C$ ; 4 -  $t = 55^\circ C$ ; 5 -  $t = 60^\circ C$ .

**Выводы.** Как видно из зависимостей, представленных на рис. 2, наибольшую нелинейность диэлектрическая проницаемость данных образца №1 наблюдается при температуре 35<sup>0</sup>С, то есть близкой к комнатной, но превышающей ее на несколько градусов. Это в значительной степени упрощает поддержание необходимого температурного режима и облегчает использование данного материала в реальных высоковольтных импульсных устройствах. Экспериментальные образцы состава № 2, данные для которого приведены на рис. 3, кроме химического состава отличаются от образцов состава № 1 технологией синтеза (был произведен более мелкий помол сырьевых компонентов, а формовка образцов была выполнена путем изостатического прессования). Как видно из графиков, это привело к значительному увеличению диэлектрической проницаемости при нарастании напряженности электрического поля в течение десятков наносекунд. Кроме того, наибольшая нелинейность диэлектрической проницаемости наблюдается при температуре 55°С.

**Список литературы:** 1. Сегнетоэлектрики и антисегнетоэлектрики / Смоленский Г.А., Боков В.А., Исупов В.А., Крайник Н.Н., Пасынков Р.Е., Шур М.С. Л.-М.: Наука, 1971. – 476 с. 2. Сегнетоэлектрики в технике СВЧ / Под ред. О.Г. Вендика. – М.: Сов. радио, 1979. – 272 с. 3. Богатырев Ю.К. Импульсные устройства с нелинейными распределенными параметрами. – М.: Сов. радио, 1974. – 280 с. 4. Белянцев А.М., Козырев А.Б. Особенности генерации высокочастотных колебаний ударной электромагнитной волной при ее синхронизме с обратной волной // ЖТФ. – 2000. – Т. 70. – Вып. 6. – С. 78-83. 5. Буслов О.Ю., Кейс В.Н., Козырев А.Б., Котельников И.В., Кулик П.В. Интегральные сегнетоэлектрические фазовращатели миллиметрового диапазона длин волн на основе периодических структур // ЖТФ. – 2005. – Т. 75. Вып. 9. – С 89-94. 6. Резинкин О.Л., Axelsson A.K., Вытришко В.В. Стенд для исследования динамики импульсной поляризации нелинейных диэлектриков // Приборы и техника эксперимента. – 2010. – № 5. – С. 142-148.

*Поступила в редколлегию 13.04.2012  
Рецензент д.т.н., проф. Рудаков В.В.*