

**И.В. Котельников<sup>1</sup>, В.Н. Осадчий<sup>1</sup>, Д.М. Косьмин<sup>1</sup>,  
А.Д. Канарейкин<sup>1</sup>, Е.А. Ненашева<sup>2</sup>, А.Б. Козырев<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>ФГБОУ ВПО Санкт-Петербургский государственный электротехнический  
университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

<sup>2</sup> ООО "Керамика"

## **Методика и устройство измерения ВЧ-СВЧ параметров нелинейной керамики в широком частотном диапазоне под воздействием полей управления**

*В статье рассмотрена разработанная авторами методика и устройство, обеспечивающее измерения зависимостей тангенса угла диэлектрических потерь ( $\operatorname{tg}\delta$ ) и диэлектрической проницаемости ( $\epsilon$ ) нелинейной диэлектрической керамики как функции напряженности электрического поля ( $E$ ) в диапазоне частот  $f = 200$  МГц – 2 ГГц. Приведены результаты измерений частотных и полевых зависимостей  $\operatorname{tg}\delta(f, E)$ , и  $\epsilon(f, E)$  для сегнетоэлектрических (СЭ) керамических образцов  $\text{Ba}_x\text{Sr}_{1-x}\text{TiO}_3$  различного состава при управляющих напряжениях до 8 кВ.*

**Ключевые слова:** ВЧ измерения, СВЧ измерения, нелинейная керамика, сегнетоэлектрик, диэлектрическая проницаемость, тангенс угла диэлектрических потерь, управляемость

В настоящее время всё больший интерес проявляется к использованию сегнетоэлектрических материалов в устройствах, рассчитанных на повышенный уровень ВЧ-СВЧ мощности. К таким устройствам можно отнести колебательные контуры связи, используемые в технологии беспроводной зарядки мобильных устройств, элементы фазосдвигающих цепей в обратных петлях связи высокоэнергичных СВЧ ускорителей и другие. Одним из основных требований при создании подобных устройств является высокая линейность характеристик элемента для рабочего сигнала при сохранении нелинейного отклика на сигнал управления. Использование керамики на основе нелинейных диэлектриков (сегнетоэлектриков в параэлектрическом состоянии) позволяет решить эти проблемы. Решение технологических задач синтеза керамики, так же как и разработка устройств на её основе требует соответствующей метрологической базы измерений её ВЧ-СВЧ параметров. Методики сверхвысокочастотных (СВЧ) измерений керамики линейных диэлектриков широко используются в метрологии элементной базы телекоммуникационных и радиолокационных систем [1 - 3]. Отличительной чертой методик и устройств измерения параметров нелинейных диэлектриков является необходимость проведения измерений при приложении к материалу электрических полей управления, что предъявляет новые требования к методикам и устройствам измерений [4].

Авторами разработаны методика и устройство, обеспечивающие измерение зависимостей тангенса угла диэлектрических потерь  $\operatorname{tg}\delta(f, E)$  и диэлектрической проницаемости  $\epsilon(f, E)$  объёмных образцов нелинейной керамики. Благодаря использованию многомодового режима возбуждения резонатора, измерения указанных зависимостей проводятся в широком частотном диапазоне (200 ÷ 2000) МГц. В статье приведены результаты измерений

зависимостей  $\text{tg}\delta(f, E)$  и  $\epsilon(f, E)$  для сегнетоэлектрических образцов  $\text{Ba}_x\text{Sr}_{1-x}\text{TiO}_3$  различного состава.

Разработанная методика основана на измерении параметров (резонансная частота, добротность) собственных резонансов керамической структуры, размещённой в металлической камере (рис.1). Особенностью методики измерений, является возможность подачи управляющего напряжения на исследуемый СЭ образец. Два идентичных керамических бруска прямоугольной формы с металлизацией поверхностей в местах их контакта между собой и со стенками камеры представляют собой измеряемую резонансную структуру. На рис. 1 приведено схематичное изображение камеры с коаксиальным фидером подачи напряжения управления и петлями связи для возбуждения по СВЧ модам измерительного сигнала.

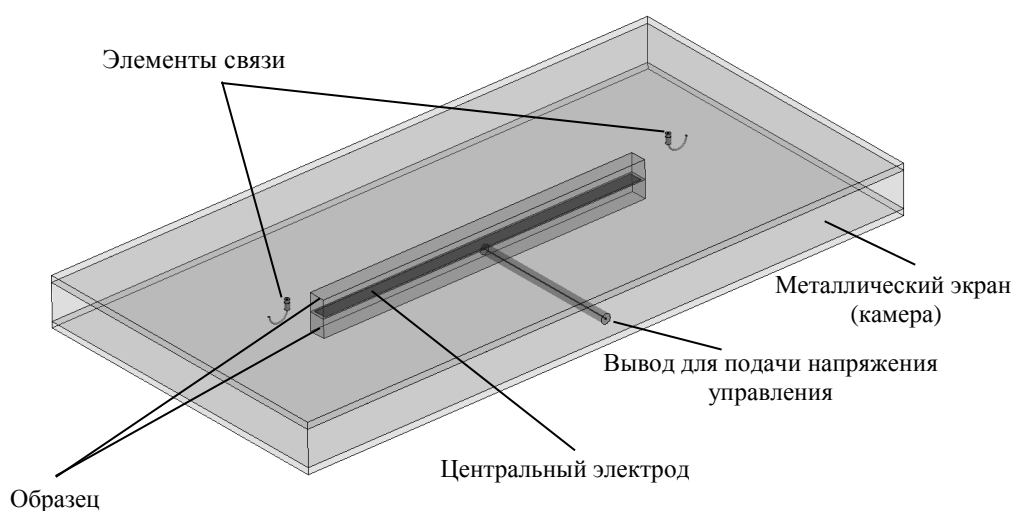


Рисунок 1

Использование несимметричных СВЧ мод типа  $\text{TE}_{10n}$ , возбуждаемых в измеряемой структуре, при симметричных относительно центрального электрода полях управления позволяют обеспечить эффективную развязку СВЧ цепи и цепи управления без использования дополнительных фильтров. Использование указанных СВЧ мод позволяет также избежать продольных токов проводимости в центральном электроде, т.е. обеспечить условия, при которых наличие электрода практически не влияет на СВЧ потери в измеряемой структуре. Результаты моделирования и измерения показывают, что величина изоляции СВЧ тракта и канала подачи управляющих напряжений превышает 25 дБ.

При возбуждении резонатора в широком диапазоне частот, наблюдается спектр собственных колебаний системы соответствующий различным модам, что иллюстрирует частотная зависимость коэффициента передачи измерительной камеры (рис. 2). Измеряя каждую моду в отдельности, можно проводить измерения диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь керамики в широком частотном диапазоне без замены образца.

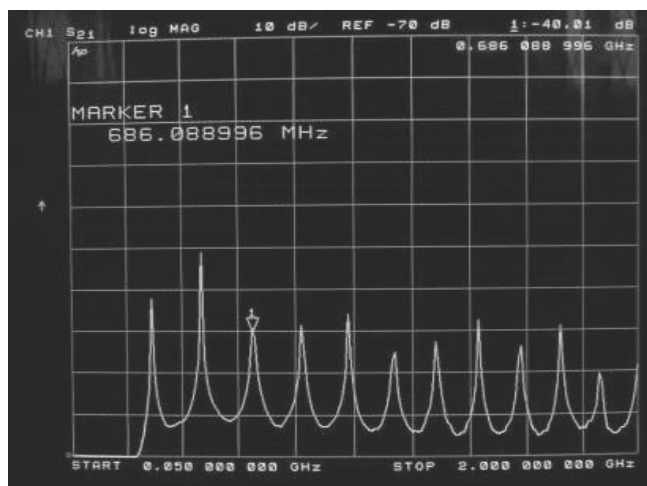


Рисунок 2

Возбуждение резонансного объёма осуществляется с помощью петель связи, короткозамкнутых на корпус камеры, что позволяет избежать выхода из строя измерительной аппаратуры в случае высоковольтного электрического пробоя сигнала управления на элементы возбуждения. Для этой же цели дополнительно используются тефлоновые шайбы, окружающие петли возбуждения.

Методика измерений была проверена на основе СЭ керамики  $Ba_xSr_{1-x}TiO_3$  (BSTO) различного состава.

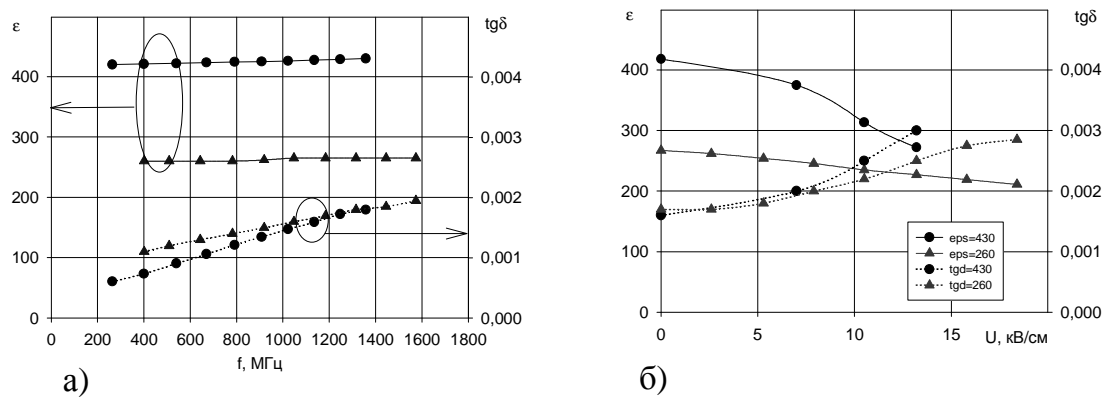


Рисунок 3

На рис. 3а приведены результаты частотных измерений  $\epsilon$  и  $tg\delta$  сегнетоэлектрических образцов с диэлектрическими проницаемостями 260 и 430 без подачи управляющего напряжения.

На рис. 3б представлены результаты измерений сегнетоэлектрической керамики различного состава при подаче управляющего напряжения 0÷8 кВ на частоте ~ 1.3 ГГц. При значениях управляющего поля ~ 13 кВ/см, тангенс угла диэлектрических потерь для образца с  $\epsilon = 260$  увеличивается в 1.5 раза, а для керамики с  $\epsilon = 430$  в 1.9 раз. Величины изменения диэлектрической проницаемости образцов при указанных величинах полей составили 1.2 и 1.6 соответственно.

Таким образом можно сделать вывод, что разработана методика, обеспечивающая измерение зависимостей тангенса угла диэлектрических потерь  $\operatorname{tg}\delta(f, E)$  и диэлектрической проницаемости  $\epsilon(f, E)$  объёмных образцов нелинейной керамики. Отличительной чертой методики является возможность проведения измерений при приложении к материалу высоких напряжений управления.

#### Библиографический список

- 1 Microwave Electronics: Measurement and Materials characterization / L.F.Chen, C.K.Ong, C.P.Neo, V.V.Varadan and V.K.Varadan. John Wiley & Sons, Ltd., 2004, 537p
- 2 J. Krupka, A.P. Gregory, O.C. Rochard, R.N.Clarke, B. Riddle, J. Baker-Jarvis. Uncertainty of complex permittivity measurements by split-post dielectric resonator technique / Journal of the European Ceramic Society. 2001, V. 21, 2673-2676p.
3. Damaskos, Inc. Material Measurements Solutions [Электрон. ресурс]. URL: [www.damaskosinc.com](http://www.damaskosinc.com) (дата обращения 14.04.2014)
4. А. В. Козырев, Д. М. Космин, И. В. Котельников, А. К. Михайлов and V. N. Osadchy. A method and device for measuring the capacitance and Q-factor of microwave varactors and variconds / Measurement Techniques, 2012, V. 55, No. 7, 834-838p.