

Рис. 3. Зависимость отношения сигнал—шум q от времени когерентного накопления сигнала t_n для СВЧ-диода 2Д203А

характер. Это подтверждает, что существует возможность когерентного накопления сигналов от ОНЭС, например, в нелинейных РСА [3—7].

Л и т е р а т у р а

1. Кондратенков Г. С., Фролов А. Ю. Радиовидение. Радиолокационные системы дистанционного зондирования Земли. М.: Радиотехника, 2005.

Таким образом, обосновано устройство экспериментальной установки, обеспечивающей адекватность процессов формирования, распространения и обработки сигналов от ОНЭС в РСА. Экспериментальным путем установлено, что для СВЧ-диода 2Д203А, зависимость отношения сигнал—шум q от времени накопления сигнала t_n имеет линейный

2. Ротхаммель К. Антенны. Минск, 2011.

3. Пат. 2347239 РФ. Способ формирования радиолокационного изображения объектов / В. П. Лихачев, Н. А. Усов // Изобретения. Полезные модели. 2009. № 5.

4. Пат. 2382380 РФ. Способ нелинейной радиолокации / В. П. Лихачев, Н. А. Усов // Изобретения. Полезные модели. 2010. № 5.

5. Пат. 2386979 РФ. Нелинейная РЛС с синтезированной апертурой антенны / В. П. Лихачев, Н. А. Усов // Изобретения. Полезные модели. 2010. № 11.

6. Пат. 2397509 РФ. Нелинейная РЛС с синтезированной апертурой антенны / В. П. Лихачев, Н. А. Усов // Изобретения. Полезные модели. 2010. № 23.

7. Иркутский О. А. и др. Дальность обнаружения объектов с нелинейными электрическими свойствами при синтезировании апертур антенны на гармониках и интермодуляционных составляющих зондирующих сигналов // Научное и технологическое. 2009. Т. 10. № 12. С. 40—43.

Дата принятия 16.06.2014 г.

53.083.2:537.226.3:537.226.4:621.3.083.2

Методика и устройство измерения СВЧ-параметров нелинейной керамики в управляющем электрическом поле

И. В. КОТЕЛЬНИКОВ*, В. Н. ОСАДЧИЙ*, Д. М. КОСЬМИН*, А. Д. КАНАРЕЙКИН*,
Е. А. НЕНАШЕВА**, А. Б. КОЗЫРЕВ*

* С.-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И.Ульянова (Ленина), С.-Петербург, Россия, e-mail: igor-vit@rambler.ru

** Научно-исследовательский институт «Гириконд», С.-Петербург, Россия

Разработана методика и устройство, обеспечивающие измерения зависимостей тангенса угла диэлектрических потерь и диэлектрической проницаемости от напряженности управляющего электрического поля для нелинейной диэлектрической керамики в диапазоне частот 200—2000 МГц. Приведены данные этих зависимостей для сегнетоэлектрических керамических образцов $Ba_xSr_{1-x}TiO_3$ различного состава и управляющих напряжений до 10 кВ.

Ключевые слова: нелинейная керамика и диэлектрики, СВЧ-измерения, сегнетоэлектрик, диэлектрическая проницаемость, тангенс угла диэлектрических потерь, управляемость.

The procedure and device to measure the parameters of nonlinear ceramics, namely the dielectric dissipation factor and permittivity as functions of control electrical field strength for frequency range 200—2000 MHz are developed. The results of measurement of these dependencies at control voltages up to 10 kV for ferroelectric ceramic samples of $Ba_xSr_{1-x}TiO_3$ different composition are presented.

Key words: nonlinear ceramic and dielectrics, microwave measurements, ferroelectric, permittivity, dielectric dissipation factor, tunability.

Методики сверхвысокочастотных (СВЧ) измерений керамики линейных диэлектриков имеют долгую историю развития, стандартизированы как в России, так и за рубежом, и широко используются в метрологии элементной базы телекоммуникационных и радиолокационных систем [1—3]. Спектр СВЧ-элементов и устройств на основе линейной керамики чрезвычайно широк: подложки, резонаторы, фильтры, излучатели антенных решеток и др.

В связи с интенсивным развитием электроники предъявляются новые требования к указанным элементам и устройствам. Одно из основных требований — необходимость создания быстродействующих устройств с частотно-фазовой перестройкой вследствие приложения управляющих электрических полей. Использование керамики на основе нелинейных диэлектриков — сегнетоэлектриков в параэлектрическом состоянии — позволяет решить эти проблемы. Выпол-

нение технологических задач синтеза керамики, так же как и разработка устройств на ее основе, предполагает соответствующую метрологическую базу для измерений СВЧ-параметров. Отличительной чертой измерений параметров нелинейных диэлектриков является необходимость приложения к материалу электрических полей управления, что предъявляет новые требования к методикам и устройствам измерений [4].

Авторами разработаны методика и устройство для измерений зависимостей тангенса угла диэлектрических потерь $\tan \delta$ и диэлектрической проницаемости ϵ объемных образцов нелинейной керамики от частоты f и напряженности управляющего поля E . Вследствие использования многомодового режима возбуждения резонатора измерения указанных зависимостей проводят в широком частотном диапазоне 200—2000 МГц. В статье приведены результаты измерений зависимостей $\tan \delta(f, E)$ и $\epsilon(f, E)$ для сегнетоэлектрических образцов $\text{Ba}_x\text{Sr}_{1-x}\text{TiO}_3$ различного состава.

Методика измерений. Разработанная методика основана на определении параметров (резонансная частота, добротность) собственных резонансов керамической структуры, размещенной в металлической камере. На рис. 1, а изображена схема камеры с коаксиальным фидером подачи напряжения управления 4 и петлями связи 2 для возбуждения измерительного сигнала по СВЧ-модам. Особенность методики — возможность подачи управляющего напряжения на исследуемый сегнетоэлектрический (СЭ) образец 1. Измеряемая резонансная структура — это два идентичных керамических бруска прямоугольной формы с металлизацией поверхностей в местах их контакта между собой и со стенками камеры. На рис. 1, б приведено распределение постоянного электрического поля смещения в результате подачи напряжения смещения на центральный электрод 5 относительно земли (экрана) и распределение поля для СВЧ-моды TE_{10n} измерительного сигнала. Использование несимметричных СВЧ-мод указанного типа, возбуждаемых в измеряемой структуре, при симметричных относительно центрального электрода полях управления обеспечивает эффективную развязку СВЧ-цепи и цепи управления без дополнительных фильтров. Необходимо подчеркнуть, что применение указанных СВЧ-мод позволяет избежать продольных токов проводимости в центральном электроде, т. е. создает условия, при которых электрод практически не влияет на СВЧ-потери в измеряемой структуре.

При возбуждении резонатора в широком диапазоне частот наблюдается спектр собственных колебаний системы, соответствующий различным модам, что иллюстрирует расчетная частотная зависимость коэффициента передачи измерительной камеры для керамического образца с $\epsilon = 430$ (рис. 2, а). Таким образом, с помощью методики можно измерять диэлектрическую проницаемость и тангенс угла диэлектрических потерь керамики в широком частотном диапазоне без замены образца. Измерив резонансные частоты собственного спектра системы, можно с высокой точностью найти диэлектрическую проницаемость образца. Тангенс угла диэлектрических потерь сегнетоэлектрического образца определяют по формуле [5]:

$$\tan \delta_d = (1/Q_0 - 1/Q_{00})/\xi, \quad (1)$$

где Q_0 — измеренная добротность камеры с измеряемым образцом; Q_{00} — добротность камеры с идеализированным диэлектриком, не имеющим потерь, обусловленная метал-

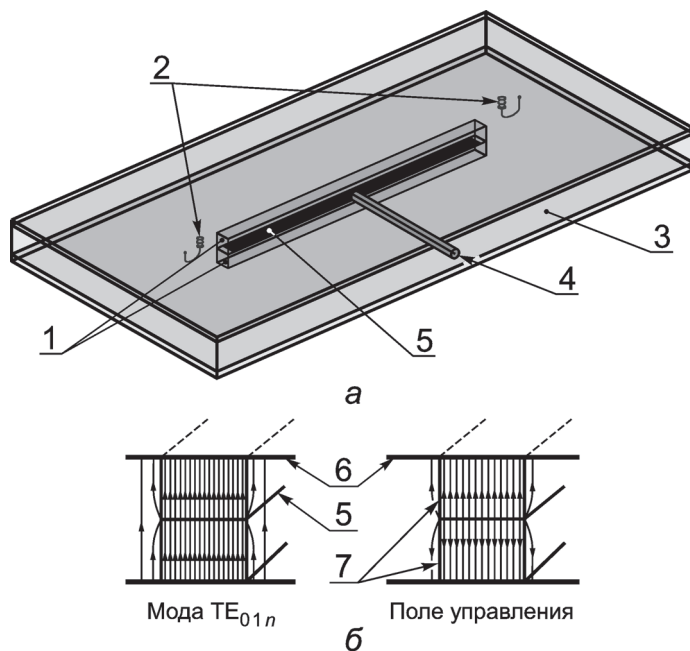


Рис. 1. Измерительная камера с образцом (а), распределение электрического поля для моды TE_{01n} и поля управления (б):

1 — образец; 2 — элементы связи; 3 — металлический экран (камера); 4 — вывод для подачи напряжения управления; 5 — центральный электрод; 6 — стенки камеры; 7 — сегнетоэлектрик

лическими потерями в ее стенках, рассчитывается на основе калибровки пустой камеры; $\xi = W_d/(W_d + W_p)$ — коэффициент включения образца в резонансную камеру, определяющий отношение энергии, запасенной в диэлектрическом образце, к суммарной энергии, запасенной в камере; W_p — энергия запасенная в воздухе резонатора.

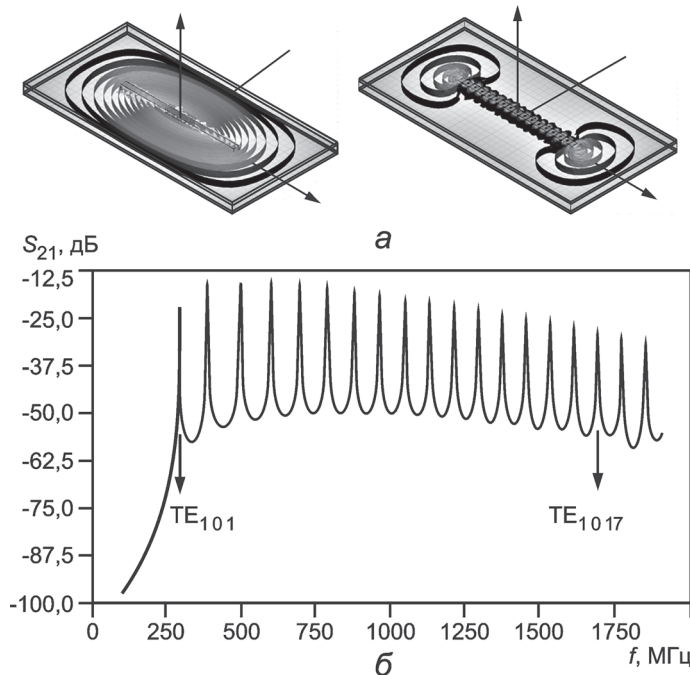


Рис. 2. Распределение электрического поля в камере с диэлектриком для мод TE_{101} (слева) и TE_{1017} (справа) (а) и частотная зависимость коэффициента передачи измерительной камеры с образцом (моделирование) (б)

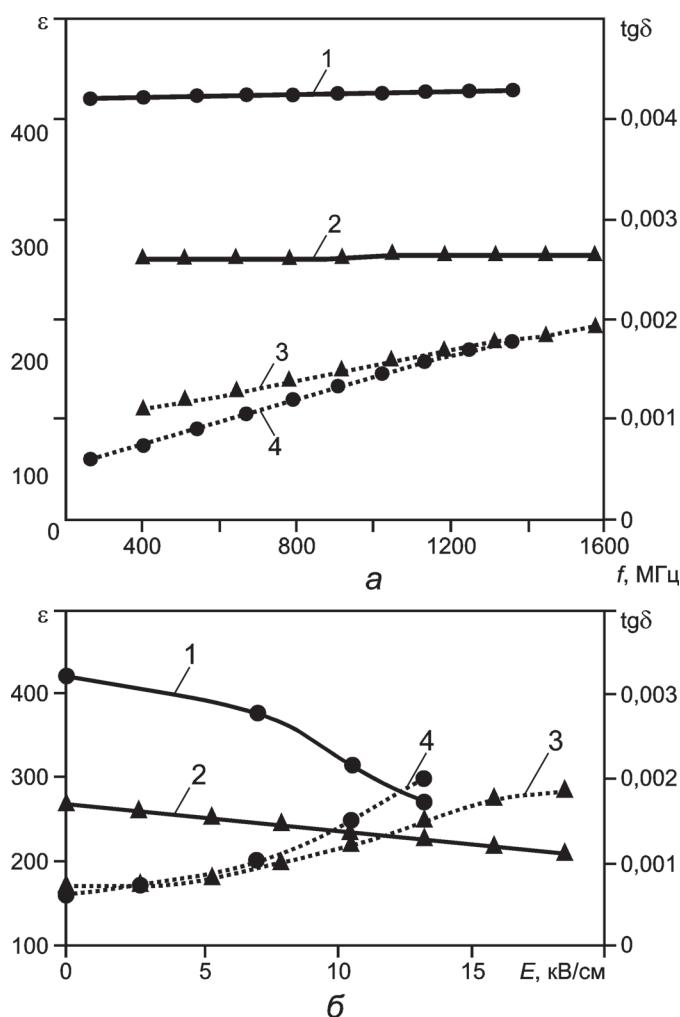


Рис. 3. Результаты измерений частотной зависимости ϵ (кривые 1, 2) и $\text{tg}\delta$ (кривые 3, 4) для СЭ-образцов с $\epsilon = 260$ (2, 3) и 430 (1, 4) при напряжении управления $U = 0$ (а) и СЭ-керамики под воздействием управляющего поля на частоте около 1,3 ГГц (б)

Точность измерительной методики тем выше, чем больше коэффициент ξ . Результаты моделирования показывают, что для образцов с $\epsilon > 150$ коэффициент включения находится в интервале 0,93–0,99 для различных типов полей и растет с увеличением частоты, что наглядно подтверждается сравнением картины концентрации напряженности E поля в области измеряемого образца для мод TE_{101} и TE_{1017} (см. рис. 2, а).

Для определения Q_{00} использовали результаты измерений собственной добротности пустой камеры Q'_{00} на частотах 1,67 и 2,69 ГГц, которая равна 3190 и 4360, соответственно. Это позволило определить эффективную проводимость стенок камеры, используемую для нахождения Q_{00} на более низких частотах измерений отдельно для каждой моды спектра. Заметим, что Q_0 и Q_{00} в соотношении (1) являются значениями собственной добротности и рассчитаны по результатам измерений нагруженной добротности с учетом коэффициента передачи S_{21} для конкретных резонансных пиков спектра.

Для подачи напряжения управления на измеряемую структуру использовали отрезок коаксиального кабеля, рас-

положенный в объеме камеры перпендикулярно силовым линиям напряженности электрического СВЧ-поля. Такое расположение подавляет возможность возбуждения в фидере СВЧ-сигнала и его утечки в цепи управления. Вследствие этого и высокого коэффициента включения диэлектрика в резонатор влияние фидера на распределения полей в камере минимально. Результаты моделирования и измерений показали, что развязка между СВЧ-трактом и каналом подачи управляющих напряжений превышает 25 дБ. Этого достаточно для проведения высокочастотных измерений и можно не использовать фильтр развязки, не ограничивая при этом спектр частот как измерительного, так и управляющего сигналов.

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

Опробывание методики. Методика измерений была проверена на основе СЭ-керамики $\text{Ba}_x\text{Sr}_{1-x}\text{TiO}_3$ (BSTO) различного состава. Выбор указанного композита не является случайным, так как при комнатной температуре он находится в параэлектрическом состоянии, в котором отсутствует частотная дисперсия диэлектрической проницаемости (вплоть до частот 100 ГГц) [6, 7]. Это позволяет сравнивать значения ϵ , измеренные в СВЧ-диапазоне, со значениями, полученными в результате измерений в ВЧ-диапазоне (1 МГц) обычных конденсаторов плоскопараллельной конструкции, изготовленных из исследуемого композита. Исследования проводили для различных керамик с диэлектрической проницаемостью в интервале $\epsilon = 150$ –450 в частотном диапазоне $f = 200$ –2000 МГц при напряжениях управления до $U = 8$ кВ. Керамические образцы имели размеры $5 \times 6 \times 108$ мм и были металлизированы пленкой из золота по плоскостям контактов. Образец с $\epsilon = 450$ имеет более плотный спектр собственных частот и более низкую частоту основной моды по сравнению с аналогичным образцом с $\epsilon = 150$.

На рис. 3, а представлены результаты частотных измерений ϵ и $\text{tg}\delta$ сегнетоэлектрических образцов с $\epsilon = 260$; 430 без подачи управляющего напряжения, на рис. 3, б — результаты измерений СЭ-керамики различного состава при подаче управляющего напряжения 0–8 кВ на частоте около 1,3 ГГц. При напряженности управляющего поля примерно 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 раза. Изменения диэлектрической проницаемости образцов при этом составили 1,2 и 1,6, соответственно.

Оценки погрешностей методики в частотном диапазоне 200–2000 МГц по измерениям ϵ составляют не более 2 %, что подтверждено сравнением с результатами ВЧ-измерений керамических конденсаторов на основе исследуемых композитов. Оценка погрешности измерений СВЧ-потерь керамических образцов с электродами составляет не более 10 %. В ряде случаев необходима информация о диэлектрических потерях непосредственно в самой керамике (диэлектрические потери). Для определения вклада металлических и диэлектрических потерь, наряду с рассмотренной методикой, необходимо использовать методики безэлектродных измерений [2, 3]. Данные таких безэлектродных измерений

позволяют получить калибровочные точки $\operatorname{tg} \delta(E = 0)$ для построения зависимости СВЧ-потерь $\operatorname{tg} \delta(E)$ в самой керамике.

Выводы. Разработанная методика обеспечивает измерения зависимостей тангенса угла диэлектрических потерь $\operatorname{tg} \delta(f, E)$ и диэлектрической проницаемости $\epsilon(f, E)$ объемных образцов нелинейной керамики. Отличительная черта методики — выполнение измерений при приложении к материалу высоких напряжений управления.

Возможности методики проиллюстрированы измерениями сегнетоэлектрической керамики в диапазоне частот до 2 ГГц. Основные методические и конструктивные подходы подобных измерений можно использовать практически для любых поддиапазонов СВЧ, включая миллиметровые.

Л и т е р а т у р а

1. **Chen L. F. e. a.** Microwave Electronics: Measurement and Materials characterization: John Wiley & Sons, Ltd, 2004.
2. **Krupka J., e. a.** Uncertainty of complex permittivity measurements by split-post dielectric resonator technique // J. Europ. Ceram. Soc. 2001. V. 21. P. 2673—2676.

3. **Damaskos. Inc.** Material Measurements Solutions [Электрон. ресурс] <http://www.damaskosinc.com> (дата обращения 14.04.2014 г.).

4. **Козырев А. Б. и др.** Методика и устройство измерения емкости и добротности СВЧ-варакторов и варикондов // Измерительная техника. 2012. № 7. С. 62—65; **Kozyrev A. B., e. a.** A method and device for measuring the capacitance and Q-factor of microwave varactors and variconds // Measurement Techniques. 2012. V. 55. N. 7. P. 834—838.

5. **Афанасьев В. П., Козырев А. Б.** Технология, свойства и применение сегнетоэлектрических пленок и структур на их основе. СПб: Элмор, 2007.

6. **Smolensky G. A.** Ferroelectrics and Related Materials. NY: Acad. Press, 1981.

7. **Tagantsev A. K. e. a.** Ferroelectric materials for microwave tunable applications // J. Electroceramics. 2003. V. 11. N. 1—2. P. 5—66.

Дата принятия 16.06.2014 г.

АКУСТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

681.787:534.6.08:620.179.16

Диапазон частот оптического приемника при регистрации поверхностных акустических волн

П. В. БАЗЫЛЕВ, В. А. ЛУГОВОЙ

Дальневосточный филиал Всероссийского научно-исследовательского института физико-технических и радиотехнических измерений, Хабаровск, Россия
e-mail: bazylev@dfvniiftri.ru, lugovoy@dst.khv.ru

Теоретически и экспериментально определена верхняя граница диапазона частот широкополосного оптического приемника поверхностных акустических волн на базе двухлучевого лазерного интерферометра в зависимости от размеров зоны приема на поверхности образца. Показано, что диапазон частот разработанного приемника составляет 0,05—53 МГц и в пределе может достигать 1 ГГц.

Ключевые слова: оптический приемник, поверхностные акустические волны, двухлучевой лазерный интерферометр, диапазон частот.

The upper limit of the frequency reproduction range of broadband optical receiver of surface acoustic waves based on the two-beam laser interferometer and depending on the diameter of the laser beam in the reception area on the sample surface is determined theoretically and experimentally. It is shown that the frequency range of developed receiver is 0,05—53 MHz and in the limit can reach 1 GHz.

Key words: optical receiver, surface acoustic waves, double-beam laser interferometer, frequency range.

Диапазон частот оптического приемника, созданного на базе двухлучевого лазерного интерферометра, определяет область дисперсии последнего, постоянной времени фотоприемника, полосой частот регистрирующей аппарату-

ры и может составлять от 0 до 10^9 Гц [1]. Такой оптический приемник применяют при акустических измерениях в качестве бесконтактного широкополосного приемника продольных и сдвиговых ультразвуковых (УЗ) колебаний.