

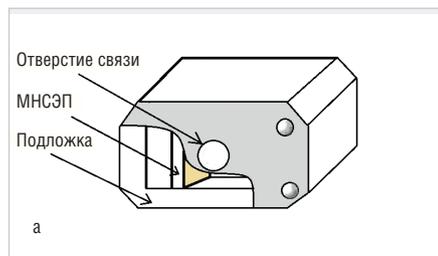
# Результаты измерений диэлектрических свойств нанокompозитных сегнетоэлектрических плёнок в СВЧ-диапазоне

Андрей Фирсенков, Игорь Мироненко, Аркадий Иванов  
(ОАО «Завод Магнетон», СПбГЭТУ «ЛЭТИ»)

**В статье рассматриваются методы измерения в СВЧ-диапазоне свойств многослойных нанокompозитных сегнетоэлектрических плёнок на основе твёрдых растворов бария-стронция (BSTO).**

В настоящее время в электронной индустрии применяются сегнетоэлектрики (СЭ) на основе титанатов, цирконатов и танталатов [1]. В СВЧ-электронике широко используются твёрдые растворы бария-стронция  $Ba_xSr_{1-x}TiO_3$  (BSTO), обладающие высоким значением диэлектрической проницаемости ( $\epsilon$ ), значительной нелинейностью и относительно малым значением тангенса угла диэлектрических потерь ( $tg\delta$ ) по сравнению с другими СЭ-материалами. Возможность добавления в твёрдый раствор BSTO примесей, таких как Mn, Mg и др. [1], позволяет варьировать электрофизические характеристики СЭ-плёнок. Отличительным преимуществом сегнетоэлектрических плёнок (СЭП) является возможность их применения в элементах ЭКБ и функциональных модулях в интегральном исполнении, что, в свою очередь, исключает применение дополнительных сборочно-монтажных и настроечных операций. Интегральный подход в сочетании с микроэлектронной технологией и относительно низкая стоимость материалов могут обеспечить значительные преимущества электрически перестраиваемых устройств на основе сегнетоэлектрических плёночных структур в условиях серийного производства.

Разработка и макетирование СВЧ-устройств на основе сегнетоэлектри-



ков, которые обладают рядом преимуществ по отношению к устройствам, изготовленным на полупроводниках и ферритах, продолжают уже на протяжении 30 лет. Интерес разработчиков к СВЧ-устройствам на основе СЭ в последние годы возрос в связи с фундаментальными исследованиями и полученными результатами, а именно с возможностью получения СЭП с температурно стабильными характеристиками, что ранее являлось сдерживающим фактором их промышленного применения. Наиболее изученными в СВЧ-диапазоне являются многослойные нанокompозитные СЭП (МНСЭП) [2, 3] на основе твёрдых растворов BSTO с разной концентрацией бария в каждом из нанослоёв, относительная диэлектрическая проницаемость которых, по отношению к полю СВЧ, изменяется более чем в 2 раза при подаче внешне-



**Рис. 1. Объёмный прямоугольный резонатор: эскиз конструкции (а), резонатор с установленной вдоль узкой стенки диэлектрической структурой (б), резонатор с элементами связи (в)**

го электрического поля напряжённостью 1,5...3 кВ/мм.

Для определения электрофизических параметров МНСЭП-структур – диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь – могут быть применены резонансные методы, которые позволяют с высокой точностью охарактеризовать их свойства в широком диапазоне частот. Одним из методов, используемых для определения параметров МНСЭП по измеренной резонансной частоте и нагруженной добротности, является измерение в объёмном резонаторе. В этом случае структура «МНСЭП – диэлектрическая подложка» будет включена в объёмный резонатор частично, как изображено на рис. 1а. Очевидно, что характеристики МНСЭП ( $\epsilon$  и  $tg\delta$ ) должны оказывать заметное влияние на резонансную частоту и добротность резонатора. В противном случае может возникнуть большая погрешность их измерения и определения. С другой стороны, конструкция резонатора, способ его возбуждения и возможность выбора связи резонатора с возбуждающим объёмом должны быть просты и надёжны.

Диэлектрический образец с МНСЭП устанавливается вдоль узкой стенки отрезка волновода (см. рис. 1б), а замкнутый объём резонатора образуется за счёт тонких металлических пластин, прикладываемых к его боковым поверхностям (см. рис. 1в). Возбуждение резонатора выполняется через круглые отверстия связи, сделанные в тонких металлических пластинах, диаметр отверстий рассчитывается с учётом обеспечения их минимальной реактивности, чтобы уменьшить влияние на значение измеряемой резонансной частоты, что в конечном итоге снизит погрешность в определении диэлектрических свойств МНСЭП.

Измерение параметров плёнок проводилось на векторном анализаторе цепей фирмы Agilent. На рис. 2 изображена резонансная характеристика пустого объёмного резонатора размером 7,10×3,40×5,05 мм. Расчётное

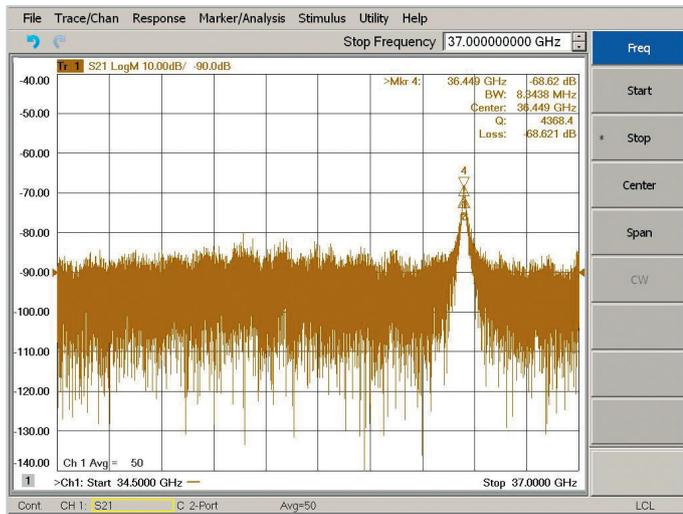


Рис. 2. Резонансная характеристика пустого объёмного резонатора

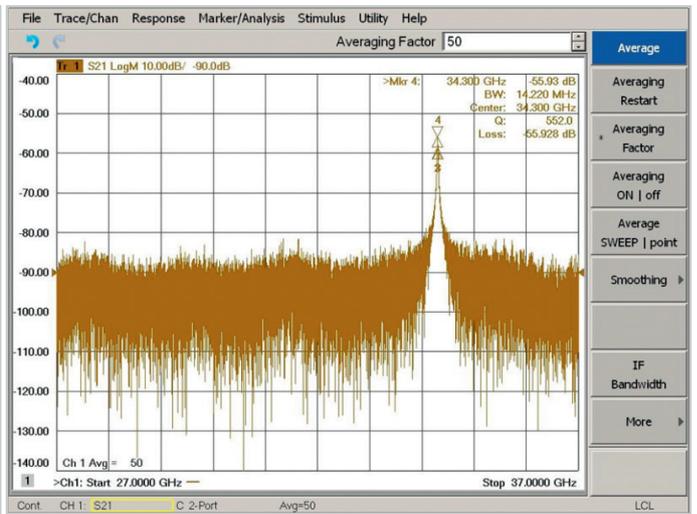


Рис. 3. Резонансная характеристика объёмного резонатора с МНСЭП

значение собственной резонансной частоты основного типа колебания резонатора с такими геометрическими размерами равно 36,424 ГГц, результат измерения его частоты на векторном анализаторе показывает значение 36,449 ГГц. Отличие расчётного значения частоты от измеренного составляет менее 0,07%. Измеренная нагруженная добротность резонатора  $Q$  имеет величину более 4000. Таким образом, полученные данные гарантируют высокую точность определения характеристик ( $\epsilon_{эфф}$  и  $tg\delta$ ) измеряемых структур используемым резонансным методом.

Расчёты характеристик МНСЭП по экспериментальным значениям резонансной частоты и добротности резонатора были выполнены на базе электродинамических моделей, подробно описанных в [4]. Точность определения диэлектрической проницаемости сегнетоэлектрической плёнки в объёмном резонаторе тем выше, чем выше коэффициент включения плёнки. Поэтому необходимо подбирать оптимальное заполнение резонатора.

На рис. 3 представлена резонансная характеристика измеряемой структуры с многослойной СЭП, изготовлен-

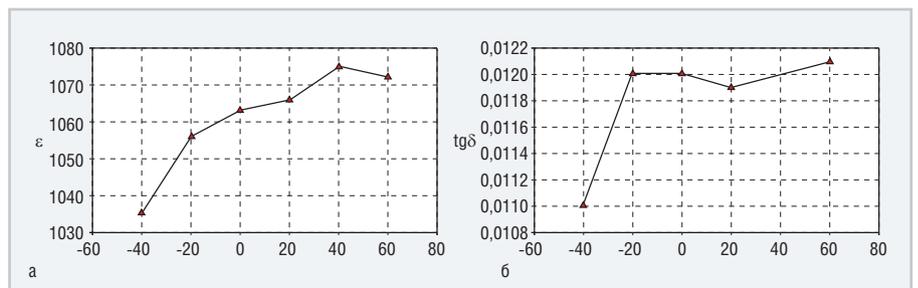


Рис. 4. Зависимость свойств МНСЭП от температуры: диэлектрическая проницаемость (а) и тангенс угла диэлектрических потерь (б)

ной по технологическому процессу JF-2. Источником погрешности в определении  $\epsilon$  и  $tg\delta$  МНСЭП являются только инструментальные погрешности, так как расчёт  $\epsilon$  и  $tg\delta$  принципиально точен [4]. В таблице 1 показаны результаты измерений резонансной частоты и добротности объёмного резонатора с диэлектрическим заполнением для различных диэлектрических структур с МНСЭП, произведённых в разных технологических режимах, и даны численные результаты расчётов их параметров.

Типовые зависимости диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь от температуры показаны на рис. 4.

Таблица 1. Расчётные значения  $\epsilon$  и  $Q_{рас}$  МНСЭП по измеренным величинам  $f_{изм}$  и  $Q_{изм}$  в объёмном резонаторе

№ образца	$f_{изм}$ , ГГц	$Q_{изм}$	$Q_{рас}$	$\epsilon$
HF-1	34,556	681	90	1272
FF-4	34,588	694	90	1251
EF-2	34,712	775	91	1167
DF-1	34,800	805	87	1105
CF-3	34,975	883	79	973
BF-2	35,482	977	34,2	513

Таблица 2. Расчётные параметры  $\epsilon$  и  $tg\delta$  МНСЭП по результатам измерений щелевых полуволновых резонаторов

Образец из серии	Четырёхщелевой резонатор		Щелевой резонатор	
	$tg\delta$	$\epsilon$	$tg\delta$	$\epsilon$
HF-1	0,01110	1276	0,01107	1267
FF-4	0,01114	1243	0,01101	1247
EF-2	0,01112	1060	0,01085	1058
DF-1	0,01152	1121	0,01151	1108
CF-3	0,01250	988	0,01243	977

Измерение диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь МНСЭП-плёнки можно выполнить, используя полуволновой резонатор (см. рис. 5а), образованный щелевой или многощелевой линией на слоистой диэлектрической подложке (1), установленный в разборный прямоугольный волновод (2). На рис. 5б

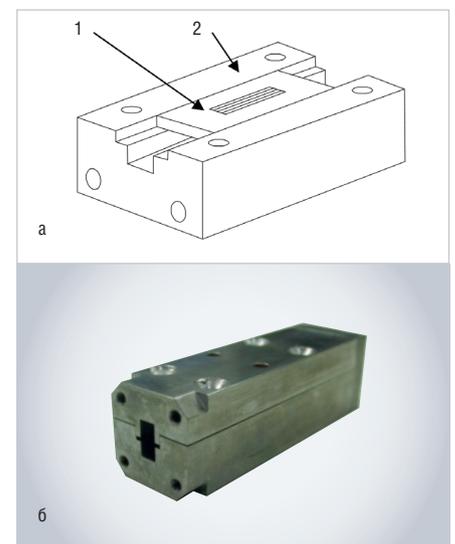


Рис. 5. Волноводная измерительная ячейка: эскиз конструкции с многощелевым резонатором на МНСЭП (а) и фотографии собранной ячейки (б)

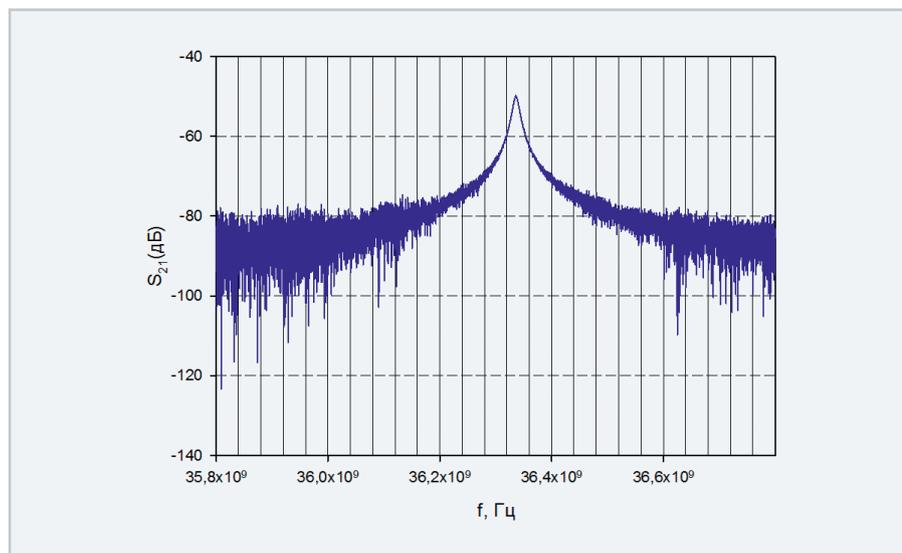


Рис. 6. Частотная зависимость коэффициента передачи  $S_{21}$  полуволнового четырёхщелевого планарного резонатора с МНСЭП

представлена фотография собранной измерительной ячейки. Расчёт параметров полуволнового щелевого резонатора подробно описан в работе [4].

Измеренная резонансная характеристика многощелевого резонатора с МНСЭП, выполненного по технологическому процессу CF-3, изображена на рис. 6. В таблице 2 представлены

расчётные  $\epsilon$  и  $\text{tg}\delta$  МНСЭП, полученные по результатам измерений частотных параметров щелевых полуволновых резонаторов.

Таким образом, полученные экспериментальные результаты показывают, что структура «диэлектрическая подложка – МНСЭП» является высокодобротной на сверхвысоких частотах,

имеет низкую температурную зависимость своих параметров и может стать основой для построения устройств с электрически перестраиваемыми АЧХ и ФЧХ, работающих в миллиметровом диапазоне длин волн.

### Литература

1. Воротилов К.А., Мухомтов В.М., Сигов А.С. Интегрированные сегнетоэлектрические устройства. Монография / Под ред. чл.-корр. РАН А.С. Сигова. – М.: Энергоатомиздат, 2011. – 175 с. ил.
2. Щелевая линия [Текст]: пат. 2443042 Рос. Федерация: МПК H01P 3/08 / Мироненко И.Г., Иванов А.А., Карманенко С.Ф., Семенов А.А., Белявский П.Ю.; заявл. 19.11.2010; опубл. 20.02.2012.
3. В.М. Балашиов, И.Г. Мироненко, А.А. Иванов, А.И. Фирсенков, Д.В. Велькин, О.В. Яковлев, Н.А. Емельянов, Технологии и диэлектрические свойства многослойных нанокompозитных сегнетоэлектрических плёнок Вопросы Радиоэлектроники, сер. РЛТ, 2018, январь, выпуск 1.
4. Иванов А.А., Мироненко, И.Г., Карманенко С.Ф., Семёнов А.А., Назаров И.А. Сегнетоэлектрические пленки и устройства на сверх- и крайне высоких частотах. – СПб.: Элмор, 2007. – 162 с., тираж 90 экз. ©

МИКРОВОЛНОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА
INWAVE.RU  
+7 (495) 137-5335

# MWA-400

## анализатор спектра и сигналов

Сделано в России

Реклама

Контрольно-измерительное оборудование

- Диапазон рабочих частот  
8 кГц - 40 ГГц
- Фазовый шум  
-137 дБн/Гц
- Полоса анализа спектра реального времени и записи  
800 МГц
- Чувствительность при 25 °С  
-155 дБм/Гц
- Минимальная полоса разрешения  
0.1 Гц



**С 30 марта по 2 апреля** в ЦВК «Экспоцентр» состоялась 15-я юбилейная международная специализированная выставка лазерной, оптической и оптоэлектронной техники «Фотоника-2021». Посмотреть экспозиции некоторых участников выставки и услышать мнение специалистов о перспективах рынка прецизионной лазерной обработки материалов можно на нашем канале!

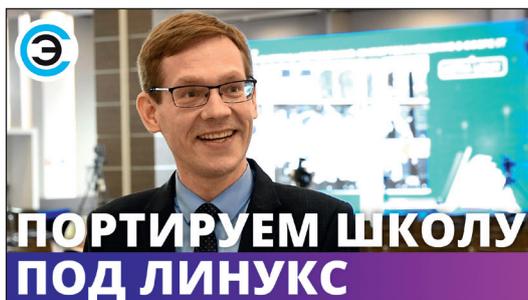
**27 мая** наша команда была в гостях у компании ТЕСТПРИБОР, проводившей X Всероссийскую научно-техническую конференцию «Электромагнитная совместимость».

На конференции была сделана масса докладов на темы испытания, разработки и аттестации оборудования. В конференции приняло участие множество специалистов как из производственных, так и из научных кругов. В кратких перерывах между мероприятиями нам удалось побеседовать с некоторыми из них. Скоро ждите на канале «Современной электроники» ролики с конференции ТЕСТПРИБОР!

Олег Кравчук, заместитель директора по стратегическим и международным проектам компании «Код безопасности»



*«...Если вы покупаете хороший станок – там стоит лазер IPG... У российских производителей есть уникальная возможность делать конкурентоспособное оборудование. Наши станки поставляются в 16 стран мира...»*



*«...установил Windows, скачал «экзеиник», запустил и получил вирус... Разработчиками Астра Линукс дописано много элементов, которых в других дистрибутивах Линукс «из коробки» нет...»*



*«...наш отечественный софт, наше отечественное оборудование нас спасут. Те данные, которые защищены сертифицированными российскими средствами, они в безопасности...»*