

Разработка керамического диэлектрика для применения в антенной технике

А. С. Антонова¹, А. С. Анохин¹, А. В. Еськов¹, А. С. Антонов²

¹Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

²АО «НПП «Радар ммс», Санкт-Петербург

as.antonova17@gmail.com

Аннотация. В работе представлены результаты комплексного исследования микрополосковой антенны (МПА) для навигационной аппаратуры потребителя (НАП), основанной на перспективной отечественной керамической подложке из твердого раствора ортотитаната магния-стронция $(1-x)\text{Mg}_2\text{TiO}_3\text{-}x\text{SrTiO}_3$. Методом высокотемпературного твердофазного синтеза освоено производство керамики с заданными свойствами и температурной стабильностью $<2\%$ в температурном диапазоне от -10°C до 120°C . Разработанная антенна на основе материала $0.8\text{Mg}_2\text{TiO}_4\text{-}0.2\text{SrTiO}_3$ демонстрирует значительный потенциал для создания современных отечественных МПА.

Ключевые слова: керамика; антенны; титанат стронция; титанат магния

I. ВВЕДЕНИЕ

Активное развитие отечественной спутниковой навигации предъявляет все более высокие требования к НАП [1]. Ключевыми направлением совершенствования НАП является разработка антенных решеток нового поколения, характеризующихся компактностью, и высокой эффективностью [2]. В этом контексте сверхкомпактные антенные решетки, где расстояние между элементами существенно меньше $\lambda/2$, а размеры самих элементов не превышают $\lambda/4$ (где λ – длина волны на рабочей частоте), а к одиночным элементам решетки предъявляются такие требования, как высокий КПД ($>80\%$), стабильная круговая поляризация (коэффициент эллиптичности $<3\text{дБ}$) и широкая диаграмма направленности, становятся стратегически важным решением.

Среди различных типов резонаторов МПА демонстрируют значительный потенциал для использования в антенных решетках НАП благодаря ряду преимущественных характеристик [3]. Однако достижение требуемой миниатюризации одиночных МПА представляет собой нетривиальную инженерную задачу. Одним из наиболее очевидных эффективных путей ее решения является применение в качестве подложки диэлектрических материалов с высокой диэлектрической проницаемостью (ϵ_r).

Керамические диэлектрики открывают уникальные перспективы. Они способны обеспечивать высокие значения ϵ_r (в диапазоне $\sim 10\ldots 120$) в сочетании с относительно низкими значениями тангенса угла диэлектрических потерь $\text{tg}\delta$, (в диапазоне $10^{-4}\ldots 10^{-3}$) [4]. Выбор оптимального керамического материала, сочетающего необходимые электродинамические свойства с технологичностью и стабильностью, является фундаментальным для создания отечественных компонентов. Это позволит решить ряд задач для специальных потребителей: обеспечить технологический суверенитет, повысить помехозащищенность и надежность аппаратуры благодаря использованию

материалов с известными и стабильными характеристиками, а также миниатюризировать конструкцию НАП.

Целью данной работы является исследование перспективности применения керамики на основе твердых растворов титаната магния-стронция и ортотитаната магния-стронция $(1-x)\text{MgTiO}_3\text{-}x\text{SrTiO}_3$ и $(1-x)\text{Mg}_2\text{TiO}_4\text{-}x\text{SrTiO}_3$ в качестве диэлектрической подложки для сверхкомпактных МПА. В рамках данной работы были поставлены следующие задачи:

- На основе электродинамического моделирования определить требования к диэлектрическим свойствам (ϵ_r , $\text{tg}\delta$) и толщине (h) подложки для малогабаритной МПА L-диапазона.
- Синтез серии керамических образцов системы $(1-x)\text{Mg}_2\text{TiO}_3\text{-}x\text{SrTiO}_3$ с варьируемым содержанием титаната стронция.
- Экспериментальное определение диэлектрических свойств и температурной стабильности синтезированных образцов.
- Определение оптимального состава керамики для изготовления подложки с заданными параметрами.

II. ТРЕБОВАНИЯ К ПОДЛОЖКЕ МПА, СИНТЕЗ И ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КЕРАМИКИ

Зависимость характерного размера резонирующей пластины прямоугольной МПА от диэлектрических свойств подложки определяется выражением [5]

$$a = \frac{\lambda}{2\sqrt{\epsilon_r}}, \quad (1)$$

где a – размер стороны резонирующей пластины, λ – длина волны. На рис. 1 представлена зависимость коэффициента полезного действия (η) МПА от толщины диэлектрической подложки h , полученная методом конечных элементов в среде электродинамического моделирования. Моделирование проведено для фиксированных значений относительной диэлектрической проницаемости подложки $\epsilon_r = 30$ и тангенса угла диэлектрических потерь $\text{tg}\delta = 0.008$ в диапазоне частот L . Полосу рабочих частот МПА можно оценить, как [6]:

$$BW = \frac{16phWq}{3\sqrt{2}\epsilon_r\epsilon_r\lambda L}, \quad (2)$$

где W – ширина МПА, L – длина МПА,
 $p = 1 - \frac{1.6605}{20}(k_0W) - 0.00119142(k_0L)^2$, $q = 1 - \frac{1}{\epsilon_r} + \frac{2}{5\epsilon_r}$,

ϵ_r — КПД антенны, связанный с возбуждением поверхностных волн в подложке, а также потерями в металле и диэлектрике, k_0 — волновое число.

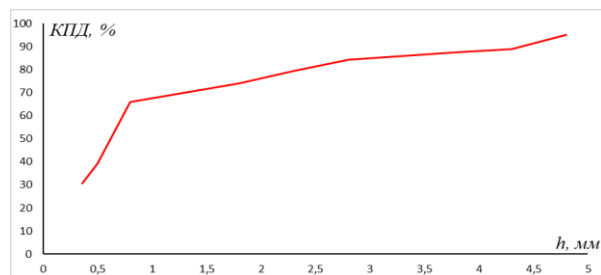


Рис. 1. Зависимость КПД МПА от толщины подложки

Из анализа выражения (1) следует, что для достижения размера резонирующей пластины МПА порядка 20 мм в диапазоне L1 требуется материал подложки с $\epsilon_r \approx 30$. Согласно результатам моделирования, представленным на рис. 1, значение КПД $\eta \geq 80\%$ достигается при толщине подложки $h \geq 2,5$ мм. Материалом, удовлетворяющим указанным требованиям по ϵ_r , может служить керамика на основе твердых растворов титаната магния-стронция $((1-x)\text{MgTiO}_3-x\text{SrTiO}_3)$ и ортитаната магния-стронция $((1-x)\text{Mg}_2\text{TiO}_4-x\text{SrTiO}_3)$.

Для диэлектрических измерений были изготовлены образцы в виде дисков диаметром 12 мм и толщиной 2 мм. Изготовление экспериментальных образцов производилось методом высокотемпературного твердофазного синтеза в 2 стадии:

- Предварительно на основе исходных оксидов и карбонатов были изготовлены шихты титаната/ортитаната магния (МТО/ОМТ) и титаната стронция (СТО). Исходные компоненты были смешаны и измельчены в среде изопропилового спирта, а затем кальцинированы в течение 2-х часов при температурах 1200 °С.
- На втором этапе полученные керамики МТО/ОМТ и СТО были повторно измельчены и смешаны в указанных мольных долях, полученная шихта была равномерно смешана с пластификатором на основе ПВС и спрессована при давлении ~0,5 ГПа. Далее сырые заготовки были спечены при высоких температурах.

В табл. 1 приведены параметры изготовленной керамики.

ТАБЛИЦА I. ПАРАМЕТРЫ ИЗГОТОВЛЕННЫХ КЕРАМИЧЕСКИХ ОБРАЗЦОВ

Обозначение материала	Стехиометрический состав	Температура синтеза
МТО	MgTiO_3	1450
ОМТ	Mg_2TiO_4	
085МТО-STO	0.85(MgTiO_3) 0.15(SrTiO_3)	1400
085ОМТ-STO	0.85(Mg_2TiO_4) 0.15(SrTiO_3)	
08ОМТ-STO	0.8(Mg_2TiO_4) 0.2(SrTiO_3)	

На рис. 2 показаны экспериментально определенные зависимости ϵ_r и $\tan \delta$ синтезированной керамики $(1-x)\text{Mg}_2\text{TiO}_4-x\text{SrTiO}_3$ от мольной доли SrTiO_3 . Повышение доли титаната стронция в твердом растворе позволяет повысить диэлектрическую проницаемость керамики, однако, это приводит к росту вносимых

потерь и снижению температурной стабильности материала в рабочем диапазоне температур.

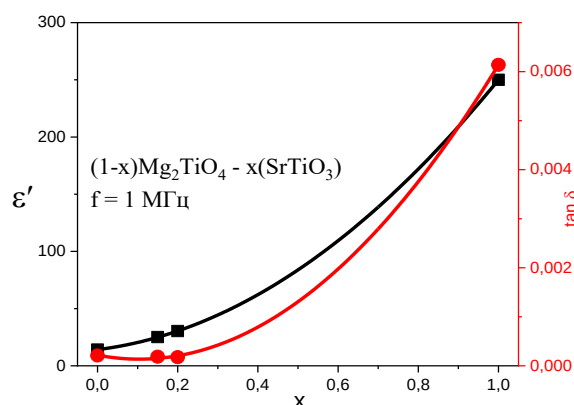


Рис. 2. Зависимость диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь в образцах $(1-x)\text{Mg}_2\text{TiO}_4-x\text{SrTiO}_3$ от содержания титаната стронция при комнатной температуре

Было определено, что твердые растворы на основе ортитаната обеспечивают существенно большую температурную стабильность диэлектрической проницаемости при сопоставимом уровне потерь, поэтому в качестве основного материала керамики для разработки антенны был выбран состав 0.8ОМТ-STO, демонстрирующий величину диэлектрической проницаемости ~30 вплоть до 8 ГГц при уровне потерь менее 10^{-3} . Температурные зависимости ϵ_r для состава $0.8\text{Mg}_2\text{TiO}_4-0.2\text{SrTiO}_3$, измеренные на различных частотах, представлены на рис. 3а. Сравнительные температурные зависимости ϵ_r для образцов различного состава приведены на рис. 3б.

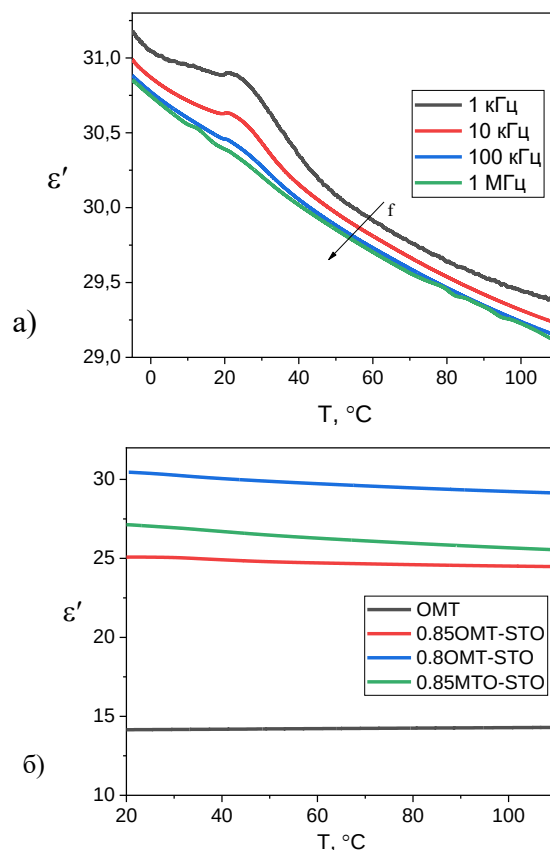


Рис. 3. Температурная зависимость диэлектрической проницаемости (а) для образца $0.8\text{Mg}_2\text{TiO}_4-0.2\text{SrTiO}_3$ на разных частотах; (б) для образцов различного состава на частоте 100 кГц

III. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ АНТЕННЫ

Диэлектрические параметры синтезированного материала $0.8\text{Mg}_2\text{TiO}_3-0.2\text{SrTiO}_3$ использованы в качестве входных данных для трехмерного электродинамического моделирования проектируемой МПА. Моделирование выполнено методом конечных элементов. Геометрия антенны и топология металлизации были выбраны исходя из требований к достижению максимально узкой полосы приема, максимального КПД антенны и минимальной эллиптичности диаграммы направленности. Геометрия модели антенны представлена на рис. 4а. Габаритные размеры антенны (включая диэлектрическую подложку) составляют $19.8 \times 19.8 \times 2.5$ мм. На рис. 4б показана смоделированная частотная зависимость коэффициента отражения разработанной МПА в диапазоне L1.

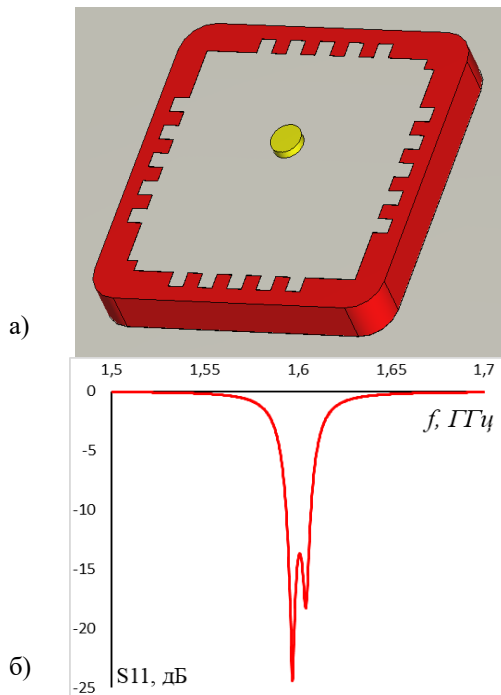
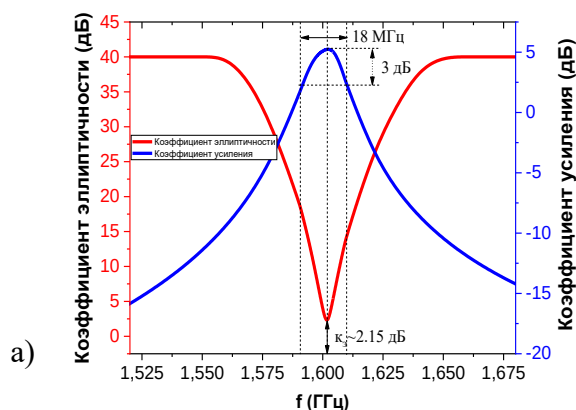


Рис. 4. Внешний вид антенны (а) и частотная зависимость коэффициента отражения (б)

Рис. 5а и 5б иллюстрирует следующие ключевые характеристики антенны на центральной частоте диапазона L1 (f_0): Значение коэффициента эллиптичности составило 2,15 дБ, ширина диаграммы направленности не менее 96 градусов, полоса рабочих частот $BW = 18$ МГц.



б)

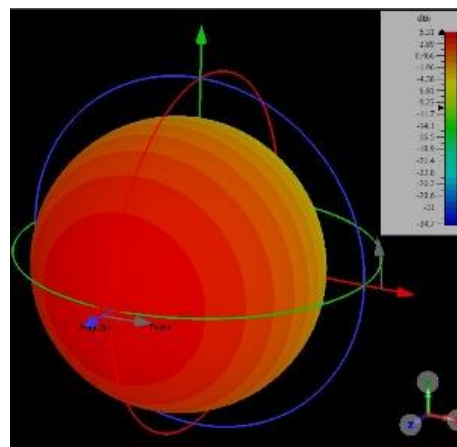


Рис. 5. Частотные зависимости коэффициентов эллиптичности и усиления разработанной антенны (а) и диаграмма направленности на центральной частоте диапазона L1 (б)

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования демонстрируют, что керамика на основе твердого раствора ортотитаната магния-стронция $(1-x)\text{Mg}_2\text{TiO}_4-x\text{SrTiO}_3$, в частности состав $0.8\text{Mg}_2\text{TiO}_4-0.2\text{SrTiO}_3$, обладает комплексом диэлектрических свойств ($\epsilon_r \approx 30$, $\text{tg} \delta \sim 10^{-3}$), важных для создания малогабаритных микрополосковых антенн в диапазоне частот L.

Керамика $0.8\text{Mg}_2\text{TiO}_4-0.2\text{SrTiO}_3$ представляет собой перспективную отечественную основу для производства антенн. Достигнутые результаты в области синтеза и характеристик материала являются существенным шагом на пути к серийному выпуску современных антенных модулей для отечественной аппаратуры потребителя.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Бордачев В.А. Исследование устройства и ТТХ космического аппарата «ГЛОНАСС-М» // Современные технологии: проблемы и перспективы: сборник статей всероссийской научно-практической конференции для аспирантов, студентов и молодых учёных, Севастополь, 15–18 апреля 2024 года. Севастополь: Севастопольский государственный университет, 2024. С. 60–65.
- [2] Эффективность применения сверхкомпактной антенной системы в компенсаторе помех / А.В. Немов, Д.А. Немов, Д.Л. Минь, С.А. Савельев, А.Н. Пластиков // Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. 2018. № 2. С. 37–46.
- [3] Антонов А.С., Капылов Е.Л. Двухрезонансная антенна L-диапазона круговой поляризации // Антенны и распространение радиоволн: сб. докл. Всероссийской научно-технической конференции, Санкт-Петербург, 23–25 октября 2024 года. Санкт-Петербург: СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2024. С. 33–36.
- [4] Толкачева А.С., Павлова И.А. Технология керамики для материалов электронной промышленности: уч. пособие в двух частях: Часть 1. 2019.
- [5] Пименов Ю.В., Вольман В.И., Муравцов А.Д. Техническая электродинамика. М.: «Радио и связь», 2000, 536 с.
- [6] Илларионов И.А. Трехдиапазонная микрополосковая антенна круговой поляризации для бортовой и наземной аппаратуры спутниковой навигации / И.А. Илларионов, Е.Л. Варенцов, М.И. Дудкин // Антенны. 2020. № 2(264). С. 19–29.