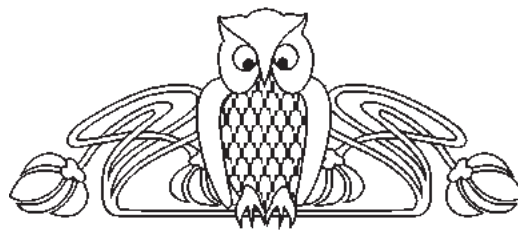




УДК 537.9

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПЛАНАРНЫХ КОНДЕНСАТОРОВ НА ОСНОВЕ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ СЕГНЕТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ



Г. В. Чучева, М. С. Афанасьев, И. А. Анисимов,
А. И. Георгиева, С. А. Левашов, А. Э. Набиев¹

Фрязинский филиал ФГБУН Института радиотехники
и электроники им. В. А. Котельникова РАН

E-mail: gvc@ms.ire.rssi.ru

¹Азербайджанский государственный педагогический университет, Баку

E-mail: gvc@ms.ire.rssi.ru

Проведенные экспериментальные исследования позволяют заключить, что в структуре $Ni/Ba_{0.8}Sr_{0.2}TiO_3/MgO$ с линейными размерами 150×150 мм можно реализовать планарный конденсаторный элемент, вариативный по диапазону ёмкости от 0.02 до 3.0 пФ, в котором увеличение ёмкости достигается путем увеличения количества электродных секций.

Ключевые слова: тонкопленочные сегнетоэлектрики, планарные конденсаторы микромасштабного размера, микрополосковые линии, фазовращатели, СВЧ устройства.

Determining Parameters of Planar Capacitors Based of Thin Film Ferroelectric Materials

G. V. Chucheva, M. S. Afanasiev, A. S. Kuznetsova,
I. A. Anisimov, A. I. Georgieva, S. A. Levashov, A. E. Nabiev

Experimental results suggest that in the $Ni/Ba_{0.8}Sr_{0.2}TiO_3/MgO$ structure with linear sizes of 150×150 mm can be realized by planar capacitor elements of variability over a range of capacity from 0.02 pF to 3.0 pF, which increased capacity is achieved by increasing the number of electrode sections.

Key words: thin film ferroelectrics, planar capacitors of microscale size, microstrip lines, phase shifters, microwave devices.

Введение

Окончание двадцатого века ознаменовалось переходом СВЧ электроники из области специальных применений в разряд массового потребления: сотовая телефония, спутниковое телевидение, глобальная информационная сеть. При этом актуальным направлением является реализация интегральных СВЧ устройств, обеспечивающих управление фазой СВЧ сигнала.

Одним из активных элементов интегральных фазосдвигающих устройств являются конденсаторы микромасштабного размера, которые могут быть непосредственно встроены в микрополосковую линию (МПЛ).

Следует отметить, что использование конструкций с распределенными параметрами на

основе МПЛ, периодически нагруженной конденсаторами микромасштабного размера, часто является единственным решением задачи обеспечения габаритных размеров и функциональных параметров фазовращателей на сверхвысоких частотах (СВЧ).

Из существующей номенклатуры конденсаторов микромасштабного размера наиболее вариативными по диапазону изменения емкости являются конденсаторы, выполненные из сегнетоэлектрика с высокой диэлектрической проницаемостью. В [1] показано, что монокристаллические пленки $Ba_{0.8}Sr_{0.2}TiO_3$ обладают низкой величиной потерь на частотах 30 ГГц и способностью при воздействии электрического поля ($U = \pm 15.0$ В) изменять диэлектрическую проницаемость.

В интегральных устройствах из конструктивных решений конденсаторов микромасштабного размера преимущества имеют планарные конденсаторы, в которых оба электрода расположены в одной плоскости, при этом встречно-штыревая топология электродов позволяет создавать в ограниченных линейных размерах конденсаторные элементы различной ёмкости от сотых долей (10^{-2} пФ) до единиц пФ.

Цель работы – определение параметров планарных конденсаторов на основе тонкопленочных сегнетоэлектрических материалов.

Задачами исследований являлись: создание планарных конденсаторов в структурах сегнетоэлектрик/диэлектрик, измерение их параметров и оценка критических режимов эксплуатации.

Методика создания планарного конденсатора

Планарные конденсаторы с встречно-штыревой конфигурацией электродов изготовлены на основе тонкопленочного сегнетоэлектрика состава $Ba_{0.8}Sr_{0.2}TiO_3$ (БСТ). Пленка БСТ толщиной



25±5 нм напылялась методом высокочастотного реактивного распыления на установке «ПЛАЗ-МА-50 СЭ» на подложки оксида магния (MgO) с кристаллографической ориентацией [001]. Полученные пленки представляли собой монокристаллические блоки, разориентация которых не превышала 0.5 градуса.

В интервале температур от -50 до +300 °С пленки обладали электрической прочностью на уровне 1.0 кВ/мм и диэлектрической проницаемостью (ϵ)≈10³. Выше +300 °С в пленках изменялась стехиометрия и резко снижались электрические параметры.

На поверхность БСТ напыляли слой металла (Ni) толщиной 0.4 мкм. На поверхности металлической пленки методом взрывной фотолитографии формировалась топология встречно-штыревых электродов и омических контактов. Топология электродов планарного конденсатора представлена на рис. 1.

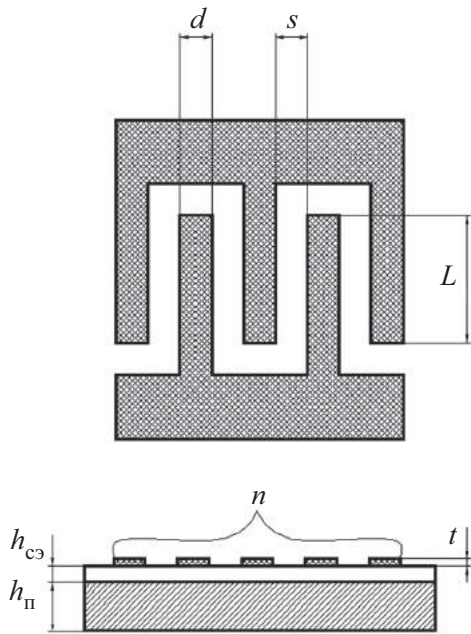


Рис. 1. Топология планарного конденсатора: s – ширина зазора между встречными штырями; d – ширина электрода (штыря); L – апертура (длина перекрытия штырей); $h_п$ – толщина подложки, $h_сэ$ – толщина сегнетоэлектрической пленки; n – количество штырей; t – толщина слоя металлизации (металлических электродов)

В структурах Ni/Ba_{0,8}Sr_{0,2}TiO₃/MgO изготовлены конденсаторы с количеством электродных секций от 2 до 100.

Измерение ёмкости планарного конденсатора

На рис. 2 приведены результаты расчета ёмкости планарных конденсаторов на основе

тонкопленочных сегнетоэлектрических материалов с различным количеством электродных секций.

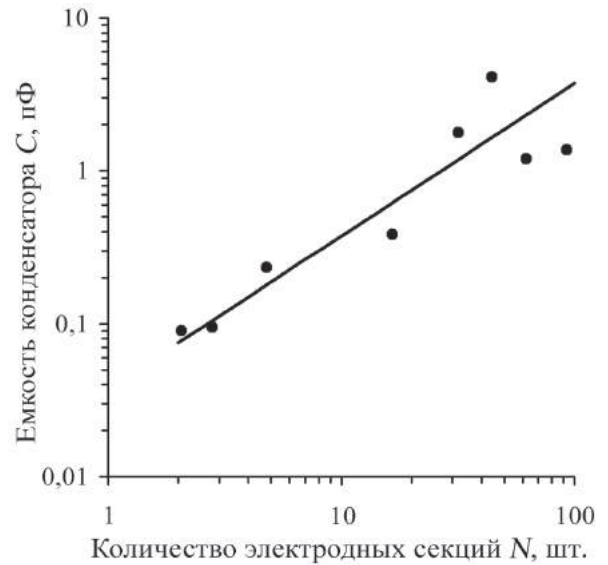


Рис. 2. Результаты расчета ёмкости планарных конденсаторов на основе тонкопленочных сегнетоэлектрических материалов (для сравнения точками отмечены экспериментальные значения изготовленных конденсаторов)

Расчет проведен при следующих исходных данных:

- по материалу конденсатора: металлические электроды сформированы на пленке сегнетоэлектрика с относительной диэлектрической проницаемостью $\epsilon_{сэ} = 850$; толщиной $h_{сэ} = 0.02$ мкм; подложка – оксид магния толщиной $h_п = 1.0$ мм с относительной диэлектрической проницаемостью $\epsilon_s = 9.8$;

- по топологии конденсатора: длина электрода $L = 100.0$ мкм; размер электрода $d = 1.0$ мкм; зазор между электродами $s = 1.0$ мкм.

Ёмкость планарных конденсаторов (C) измеряли на Keihtley 4200SCS на частоте 1 МГц при помощи зондовой станции РМ-5 MicroТес. Измерения проводили при комнатной температуре.

В таблице представлены значения емкости C , измеренные для конденсаторов с разным количеством электродных секций N . Также приведены для каждого встречно-штыревого конденсатора линейные размеры d – ширина электрода и s – зазор между соседними электродами. В конденсаторах длина электродов составляла 100 ± 0.15 мкм.



Значения ёмкости конденсаторов с различным количеством электродных секций

Количество электродных секций N , шт.	Ширина зазора s , мкм	Ширина электрода d , мкм	Ёмкость конденсатора C , пФ
2	1.10	0.83	0.093
5	0.91	1.05	0.180
10	0.87	1.09	0.337
25	0.87	1.07	0.703
50	1.00	0.97	1.463
100	1.00	0.97	2.990

Оценка проходной мощности сегнетоэлектрического планарного конденсатора с встречно-штыревой конфигурацией электродов

Фактором, влияющим на конструкцию конденсаторов в составе СВЧ устройств, является рассеиваемая СВЧ мощность, что требует эффективного отвода тепла для стабильной работы конденсаторов микромасштабного размера.

Следует отметить, что планарный конденсатор в СВЧ устройствах средней мощности работает в жестких температурных условиях. Поглощенная конденсатором СВЧ мощность (P), как следует из формулы (1), зависит от условий его функционирования, напряженности электрического поля в межэлектродном пространстве (E), частоты СВЧ сигнала (f), тангенса угла потерь ($\text{tg}\delta$) и диэлектрической проницаемости ($\epsilon_{сэ}$) в диапазоне рабочих частот [2]:

$$P = \epsilon_0 \epsilon_{сэ} \cdot E^2 f \cdot \text{tg}\delta / 2. \quad (1)$$

Если теплоотвод из конденсатора осуществляется только через подложку, внешняя поверхность которой находится при температуре окружающей среды (T_0), то в рабочем режиме температура нагрева конденсатора ($T_{\text{конд}}$) может быть рассчитана из формулы

$$T_{\text{конд}} = T_0 + \frac{Ph_{сэ}^2}{2\theta_{п}} \Psi, \quad (2)$$

где $h_{сэ}$ – толщина подложки, $\theta_{п}$ – теплопроводность подложки, Ψ – геометрический фактор.

Ψ определяется из формулы (3) исходя из конструкции конденсатора – толщины подложки ($h_{п}$) и пленки сегнетоэлектрика ($h_{сэ}$), а также их теплофизических характеристик – теплопроводностей подложки ($\theta_{п}$) и пленки ($\theta_{сэ}$):

$$\Psi = \frac{2}{\pi} \ln \frac{h_{п}}{h_{сэ}} + \frac{\theta_{сэ}}{\theta_{п}}. \quad (3)$$

Учёт в конструкции планарного конденсатора удельной теплоемкости материала (C_V) и теплофизических свойств подложки позволяет оценить из (4) длительность переходного про-

цесса, тепловую постоянную времени элемента (τ), т. е. время теплообмена конденсатора с окружающей средой:

$$\tau = \frac{C_V h_{сэ}^2}{2\theta_{сэ}} \Psi. \quad (4)$$

На основании расчетов проведена оценка критических режимов эксплуатации конденсатора на частотах 3÷15 ГГц при различной проходной мощности.

Оценка критических режимов проведена исходя из электрических, теплофизических свойств материалов и конструкции (толщины подложки) конденсатора:

сегнетоэлектрическая пленка

– толщина $h_{сэ} = 0.02$ мкм;

– относительная диэлектрическая проницаемость $\epsilon_{сэ} = 850$;

– теплопроводность $\theta_{сэ} = 6$ Вт/м · К;

– теплоёмкость $C_V = 1.2 \cdot 10^6$ Дж/м³;

– тангенс угла диэлектрических потерь

$\text{tg}\delta = 2 \cdot 10^{-5}$ на частоте 15.0 ГГц;

подложка (оксид магния)

– толщина подложки $h_{п} = 0.9$ мм;

– теплопроводность $\theta_{п} = 76$ Вт/м · К;

– тангенс угла диэлектрических потерь

$\text{tg}\delta = 2 \cdot 10^{-5}$ на частоте 15.0 ГГц;

– объем микроконденсатора из 50 электродных секций $V = 0.3$ мм³.

режим эксплуатации

– максимальная рабочая температура $T_{\text{конд}} = 300$ °С;

– максимальная проходящая мощность $P = 5$ Вт;

– максимальная напряженность электрического поля $E = 0.7$ кВ/мм в межэлектродном пространстве в режиме перестройки емкости конденсатора.

Критический режим эксплуатации определен как температурный режим работы конденсатора, ограниченный 300 °С. На рис. 3 представлена корреляция проходной мощности и времени на-

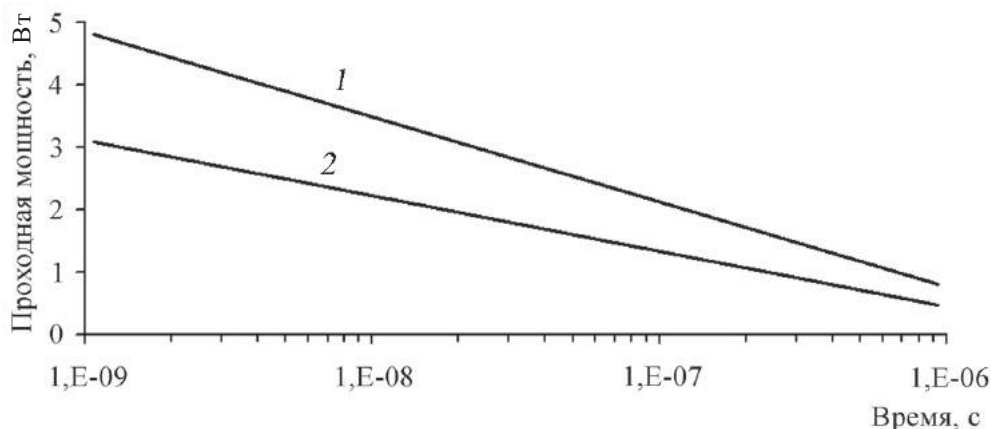


Рис. 3. Корреляция проходной мощности и времени нагрева конденсатора от комнатной температуры до 300 °С: 1 – $f = 3$ ГГц, 2 – $f = 15$ ГГц

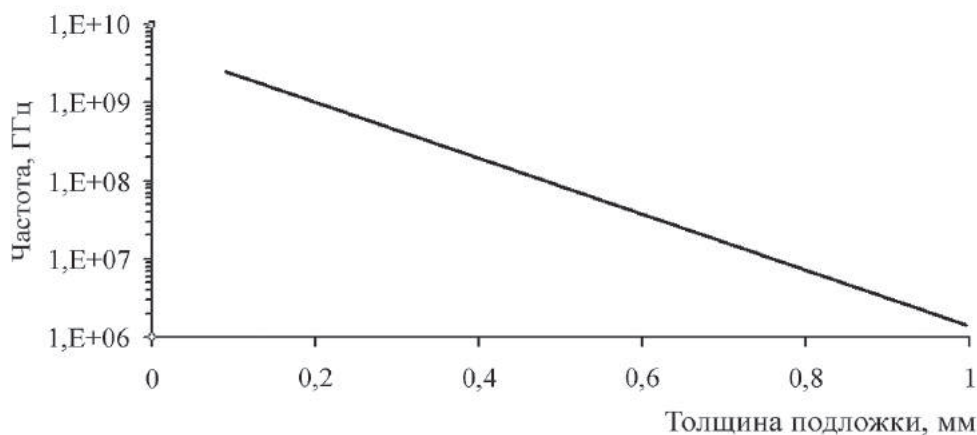


Рис. 4. Влияние толщины подложки на диапазон рабочих частот планарного конденсатора

грева конденсатора от комнатной температуры до температуры 300 °С.

На рис. 4 представлено влияние конструкции конденсатора (толщины подложки) на диапазон рабочих частот.

Выводы

Проведенные экспериментальные исследования позволяют заключить, что в структуре $\text{Ni}/\text{Ba}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{TiO}_3/\text{MgO}$ с линейными размерами 150×150 мм можно реализовать планарный конденсаторный элемент вариативный по диапазону ёмкости от 0.02 до 3.0 пФ, в котором увеличение ёмкости достигается путем увеличения количества электродных секций.

Анализ расчетов показал, что даже при сравнительно низкой величине потерь ($\approx 10^{-5}$) пленок $\text{Ba}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{TiO}_3$ на частоте 15.0 ГГц в конденсаторе объемом $\approx 1.0 \text{ мм}^3$ рассеивается мощность порядка 10 Вт/мм³ и при толщине подложки оксида магния более 0.9 мм реальный конденсатор

может работать при проходящей мощности 5 Вт на частоте 3 ГГц, либо в импульсном режиме на более высоких частотах. Работоспособность при мощности 5 Вт на частоте 15 ГГц обеспечивается созданием планарного конденсатора на кристалле оксида магния толщиной 0.1 мм.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (госконтракт № 16.513.11.3072), РФФИ (проект № 12-07-00662-а), Программы фундаментальных исследований Президиума РАН.

Список литературы

1. Воротилов К. А., Мухортов В. М., Сигов А. С. Интегрированные сегнетоэлектрические устройства / под ред. чл.-корр. РАН А. С. Сигова. М. : Энергоатомиздат, 2011.
2. Спектор Н. Оценка допустимой мощности в полосковой линии // Полосковые системы сверхвысоких частот / пер. с англ. ; под ред. В. И. Сушкевича. М. : Иностран. лит., 1959. С.160–172.