

УДК 537.871.5

ВЛИЯНИЕ ПОЛЯРИЗАЦИИ НАНОРАЗМЕРНЫХ ПЛЕНОК ТИТАНАТА БАРИЯ-СТРОНЦИЯ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ СЕГНЕТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ФАЗОВРАЩАТЕЛЕЙ СВЧ ДИАПАЗОНА

© 2024 г. В. М. Мухортов^{1,*}, С. В. Бирюков¹, Ю. И. Головкин¹, С. И. Масычев¹

¹ Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Федеральный исследовательский центр Южный научный центр Российской академии наук», Ростов-на-Дону, Россия

* E-mail: mukhortov1944@mail.ru

Поступила в редакцию 04.12.2023

После доработки 20.12.2023

Принята к публикации 29.01.2024

Рассмотрены особенности поведения поляризации и управляемости тонких сегнетоэлектрических пленок титаната бария — стронция в широком температурном интервале для двух групп, отличающихся условиями получения. Отмечена опосредованная связь коэффициента управляемости пленочных конденсаторов с поляризацией пленок.

Ключевые слова: сегнетоэлектрическая пленка, управляемость, плоский конденсатор, сегнетоэлектрический фазовращатель

DOI: 10.31857/S0367676524050013, EDN: OYESGE

ВВЕДЕНИЕ

Для разработки современных радиоэлектронных систем наземного и космического базирования востребованы антенны с управляемой диаграммой направленности (так называемые фазированные антенные решетки — ФАР). Базовый элемент ФАР — фазовращатель, способный обеспечить максимально высокое быстродействие, малую мощность в цепях управления, возможность работать на высоких уровнях СВЧ мощности. При этом необходимо добиться низкой стоимости массового производства фазовращателей, поскольку стоимость именно этого элемента в основном определяет общую цену изготовления ФАР. Из-за физических ограничений невозможно достижения выше указанных свойств для существующих ферритовых и полупроводниковых материалов [1]. В то же время современный уровень технологии получения микроэлектронных сегнетоэлектрических элементов позволяет осуществить производство фазовращателей для ФАР, удовлетворяющее перечисленным выше требованиям. Предложены конструкции и прототипированы характеристики реализованных макетов сегнетоэлектрических фазовращателей на основе микрополосковых и щелевых линий, копланарных волноводов и копланарных полосковых линий [2–6].

Однако возрастание требований к новым конструкциям и дальнейшее улучшение характеристик управляемых устройств СВЧ и миллиметрового диапазона длин волн стимулируют продолжение работы

по совершенствованию сегнетоэлектрических элементов, применяемых в радиоэлектронных системах. Для оптимизации уже известных и разработки новых конструкций фазовращателей необходимо доскональное изучение основных физических аспектов, определяющих диэлектрические свойства тонких сегнетоэлектрических пленок, в частности динамики переключения поляризации. Быстродействие фазовращателя определяет, например, количество сопровождаемых целей ФАР, которыми, в частности, могут быть искусственные спутники Земли. Но быстродействие связано с явлением переключения поляризации в тонких сегнетоэлектрических пленках, а процесс переполаризации влияет на уровень вносимых потерь устройства.

Сегнетоэлектрические тонкие пленки титаната бария-стронция (BST) обладают высокой диэлектрической проницаемостью при малых диэлектрических потерях и токах утечки. Они не подвержены усталости или старению и обладают стабильными характеристиками в широком диапазоне температур. Поэтому на протяжении, по крайней мере, трех последних десятилетий активно проводятся исследования их электрофизических характеристик с целью применения этих пленок в различных областях микроэлектроники и оптоэлектроники, а также в качестве элементов в высокочастотных СВЧ устройствах (в том числе фазовращателях для ФАР) [7–15].

Наноразмерные сегнетоэлектрические гетероструктуры имеют перспективы применения в космическом

приборостроении [16], но требуют дальнейшего исследования их свойств. Цель работы — исследование процесса переключения поляризации в планарных структурах с наноразмерными сегнетоэлектрическими пленками титаната бария — стронция как одного из факторов, определяющих характеристики фазовращателей.

ЭКСПЕРИМЕНТ

Исследование особенностей переключения поляризации в планарных структурах с наноразмерными сегнетоэлектрическими пленками ($\text{Ba}_{0,8}\text{Sr}_{0,2}\text{TiO}_3$) проводилось с помощью методики Сойера — Тауэра в широком диапазоне напряжений и частот переключающего поля по методике аналогичной [17]. Толщина измеряемых образцов составляла величину ~ 40 нм.

В схеме Сойера — Тауэра при регистрации напряжения на эталонном конденсаторе, пропорционального величине поляризации тестируемого образца, в случае планарной геометрии электродов возникает ряд технических трудностей. Расширение рабочего диапазона исследуемых сигналов в низкочастотную область требует увеличения постоянной времени τ входной цепи измерительного усилителя:

$$\tau = C_{\text{эт}} R_{\text{вх}}, \quad (1)$$

где $C_{\text{эт}}$ — емкость эталонного конденсатора в схеме Сойера — Тауэра, $R_{\text{вх}}$ — входное сопротивление измерительного усилителя.

Для проведения корректных измерений постоянная времени τ должна существенно (на два — три порядка) превышать период самого низкочастотного сигнала. Максимальное значение величины $R_{\text{вх}}$ определяется токами утечки первого каскада входной микросхемы измерительного усилителя и не может превышать определенной, зависящей от типа применяемых комплектующих, величины. В нашем случае при использовании микросхемы AD549 фирмы Analog Device $R_{\text{вх}} = 100$ ГОм. Исходя из этой величины $R_{\text{вх}}$, выбрано значение $C_{\text{эт}} = 1$ мкФ, что позволяет достоверно обеспечить ниже значение измерительной частоты $f \sim 0.005$ Гц. Но большее значение $C_{\text{эт}}$ приводит к тому, что величина измеряемого на этом конденсаторе напряжения, пропорционального величине заряда поляризации, становится недопустимо малой. Как пример, при величине заряда переполяризации $q = 1$ пКл, измеряемое напряжение на эталонном конденсаторе будет составлять величину $U = 1$ мкВ, что сопоставимо с уровнем собственных шумов усилителя. Для повышения уровня регистрируемого сигнала необходимо увеличить значение переключаемой поляризации. Достигается это путем увеличения эффективной площади сбора заряда с планарного конденсатора, то есть увеличением числа и длины штырей встречно-штыревого преобразователя (ВШП). Следствием подобного увеличения будет рост как величины переключаемой поляризации, так и емкости образца.

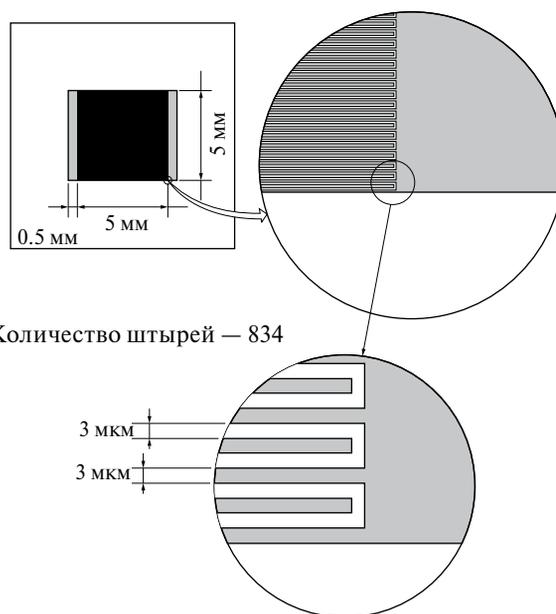


Рис. 1. Топология планарного конденсатора (ВШП).

Для проведения электроизмерений методами «взрывной» фотолитографии на поверхности плёнки сформирована топология планарных конденсаторов в виде структуры встречно-штыревых преобразователей. Топология планарного конденсатора (ВШП) показана на рисунке 1.

Исследуемые образцы по данным рентгенографии условно можно разделить на две группы: с меньшим ($c \sim 0.3989$ нм) и большим ($c \sim 0.4037$ нм) значениями параметра элементарной ячейки. Конкретное значение параметра элементарной ячейки определялось условиями осаждения (либо слоевой, либо блочный механизм роста). Меньший параметр элементарной ячейки ($c \sim 0.3989$ нм) соответствовал пленкам, осажденным по механизму Франка — Ван дер Мерве (слоевой механизм роста). Большой параметр ($c \sim 0.4037$ нм) соответствовал механизму осаждения Вольмера — Вебера (блочный механизм роста) [17]. В остальном (материал, толщина и размер подложки MgO , толщина пленок ($\text{Ba}_{0,8}\text{Sr}_{0,2}\text{TiO}_3$) образцы обеих групп не отличались. Монокристаллические пленки $\text{Ba}_{0,8}\text{Sr}_{0,2}\text{TiO}_3$ осаждались на технологической установке «ПАЗМА-50 СЭ» распылением стехиометрической мишени состава $\text{Ba}_{0,8}\text{Sr}_{0,2}\text{TiO}_3$ по методике, описанной в [17].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

При проведении измерений установлено, что образцы с меньшим значением параметра ячейки ($c \sim 0.3989$ нм) обладают более четко выраженной зависимостью поляризации от смещающего поля. Петля гистерезиса такой пленки насыщена, спонтанная (реориентационная) поляризация составляет величину $P_r \sim 15$ мкКл·см⁻², остаточная поляризация

$P_0 \sim (5-7) \text{ мкКл}\cdot\text{см}^{-2}$. Это указывает на то, что пленка находится в сегнетоэлектрической фазе. В то же время для другой группы образцов с большим значением параметра ячейки ($c \sim 0.4037 \text{ нм}$) характерно практически полное отсутствие остаточной поляризации при комнатной температуре (рис. 2).

Изучение температурных зависимостей поляризации пленок подтверждает сильное размытие фазового перехода (для объемного образца аналогичного состава $T_c \sim 80 \text{ }^\circ\text{C}$). Остаточная поляризация монотонно возрастает при понижении температуры (рис. 2).

В ходе диэлектрических измерений обнаружена четкая корреляция между структурными и электрофизическими свойствами пленок. Коэффициент управляемости K ($K = U_0/U_{\text{max}}$) при напряженности внешнего поля $E \sim 100 \text{ кВ}\cdot\text{см}^{-1}$ составляет для этих групп пленок величину $K \geq 2.5$ и $K \sim 1.1$ соответственно (рис. 3). Из этого следует, что применение наноразмерных пленок $\text{Ba}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{TiO}_3$, осажденных на подложки MgO по механизму Вольмера — Вебера (блочный механизм роста), для формирования планарных конденсаторов не имеет смысла в виду их крайне низкого коэффициента управления.

Зависимостей величины поляризации и формы петель диэлектрического гистерезиса от частоты внешнего переполяризующего поля в диапазоне ($10^{-2} - 10^3$) Гц для пленок, осажденных по механизму Франка — Ван дер Мерве (слоевой механизм роста) не обнаружено, что отличает пленки с планарными электродами от структур металл-диэлектрик-металл с сегнетоэлектрическими пленками. Обнаруженная особенность свидетельствует о том, что критические частоты переключения поляризации пленок, осажденных на диэлектрик MgO , лежат за пределами нашего измерительного диапазона.

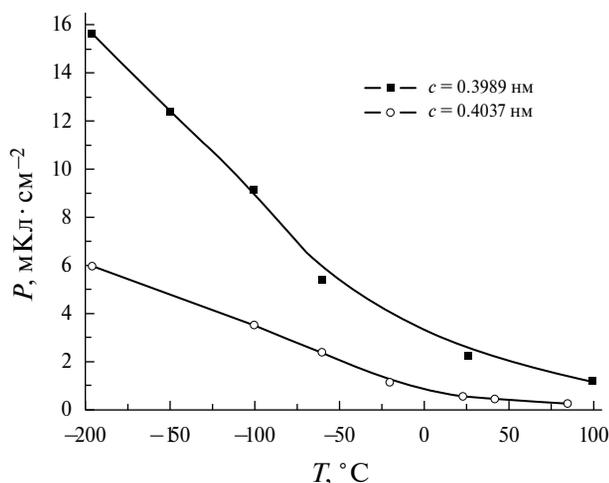


Рис. 2. Температурные зависимости остаточной поляризации (P) для образцов с различными значениями параметра элементарной ячейки (c).

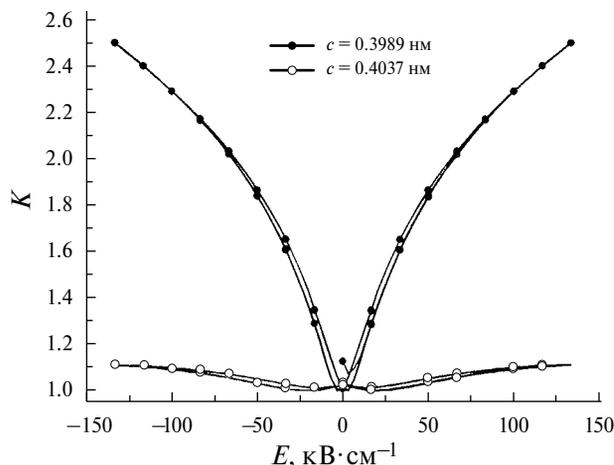


Рис. 3. Зависимости коэффициентов управляемости (K) от напряженности приложенного поля смещения (E) для образцов с различным параметром кристаллической решетки (c).

Сопоставление результатов, приведенных на рисунках 2 и 3, свидетельствует о наличии некоей опосредованной связи (через параметр элементарной ячейки c) между коэффициентом управляемости и поляризацией пленок. Физические механизмы, определяющие отмеченную опосредованную связь, подлежат более детальному изучению по методике аналогичной [18]. В указанной работе проведено экспериментальное исследование сверхбыстрого нелинейно-оптического отклика сегнетоэлектрических пленок $\text{Ba}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{TiO}_3$, осажденных на подложки MgO , на электрическое поле импульсов, длительностью порядка 100 фс. Приведенные выше результаты учтены при проектировании фазовращателя на основе монокристаллических наноразмерных пленок $\text{Ba}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{TiO}_3$.

СЕГНЕТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ФАЗОВРАЩАТЕЛЬ

Для верификации полученных результатов реализован лабораторный макет фазовращателя, в конструкции которого использованы планарные конденсаторы на основе осажденных по механизму Франка — Ван дер Мерве (слоевой механизм роста) наноразмерных пленок $\text{Ba}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{TiO}_3$, находящихся в сегнетоэлектрической фазе. Использование сегнетоэлектрических планарных конденсаторов в конструкциях фазовращателей имеет смысл, например на частотах ниже 10 ГГц, поскольку при уменьшении частоты длина фазовращателей, реализованных на основе элементов с распределенными параметрами, катастрофически увеличивается. Размер устройства можно существенно снизить путем использования схемы на сосредоточенных элементах. Четвертьволновый отрезок передающей линии, обеспечивающей

фазовый сдвиг 90° , можно заменить фильтром низкой частоты (ФНЧ) на сосредоточенных элементах L и C . Используя в качестве конденсатора C управляемый сегнетоэлектрический конденсатор и подавая на него постоянное напряжение смещения, можно изменять параметры линии передачи, в частности, фазовую скорость и характеристический импеданс. Коэффициент управляемости планарного конденсатора K ($K = U_0/U_{\max}$) для используемых нами пленок $\text{Ba}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{TiO}_3 \sim 2.5$. Путем каскадного последовательного соединения ФНЧ можно получить требуемый фазовый сдвиг 360° . Расчеты для топологии конденсатора и индуктивности проводились методами теории цепей. При рабочей частоте 1.7 ГГц элементы эквивалентной схемы должны составлять: емкость $C = 1.59$ пФ, индуктивность $L = 3.98$ нГн. Такие параметры C и L для одной элементарной ячейки ФНЧ вносят фазовый сдвиг в 28° . Для обеспечения фазового сдвига на 360° фазовращатель должен состоять из 13 последовательно соединенных ячеек ФНЧ с топологией, приведенной на рисунке 4.

Использовалась гетероструктура, состоящая из подложки MgO (100) толщиной 0.5 мм, и пленки $\text{Ba}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{TiO}_3$ толщиной 40 нм. В фазовращателе реализована емкость в виде планарного конденсатора с конструкцией, показанной на вставке рисунка 4.

Топология схемы фазовращателя формировалась методом взрывной фотолитографии. На поверхности пленки была сформирована фоторезистивная маска, на которую методом магнетронного напыления наносился алюминий толщиной 1.5 мкм. Измерения S -параметров проводилось на векторном анализаторе цепей Agilent E5071B в диапазоне частот от 30 МГц до 2 ГГц. Постоянное управляющее напряжение подавалось на конденсаторы непосредственно через центральный проводник копланарного волновода с помощью устройств подачи смещения (bias tee). Результаты измерений показали, что на частоте 1.7 ГГц фазовращатель обеспечивает фазовый сдвиг 340° при управляющем напряжении 30 В и вносимых потерях от 8 дБ (0 В) до 4.5 дБ (30 В). Фактор качества $\sim 50^\circ \cdot \text{дБ}^{-1}$. При этом на частоте 1.7 ГГц КСВН по входу и выходу не превышает значения 1.32 при любом значении управляющего напряжения, лежащего в диапазоне от 0 до 30 В.

Диэлектрические потери в пленках определяются качеством кристаллической структуры, переходным слоем между пленкой и подложкой, стехиометрией компонент. Быстродействие фазовращателя определяется длительностью процесса переполаризации. Для поликристаллических пленок возможно замедление процесса переполаризации за счет взаимодействия междоменных границ и наличия дефектов кристаллической решетки материала.

Структурное совершенство обычно используемых в фазовращателях поликристаллических пленок невысокое. Оптимизация фазовращателя возможна при переходе к гетероэпитаксиальным структурам

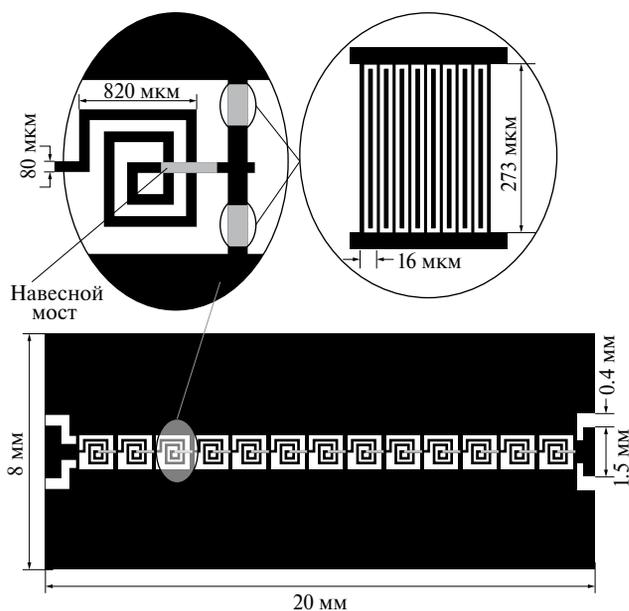


Рис. 4. Топология фазовращателя, в конструкции которого использованы планарные конденсаторы на основе наноразмерных пленок $\text{Ba}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{TiO}_3$.

за счет их более высокого структурного совершенства. Достаточно большая величина вносимых потерь в реализованном фазовращателе обусловлена малой толщиной используемых проводников. Толщину проводников следует делать равной утроенной толщине скин-слоя используемого металла на нижней частоте рабочего диапазона. На частоте 1.7 ГГц толщина скин-слоя для алюминия составляет примерно 2 мкм. В реализованном фазовращателе толщина металлизации 1.5 мкм (сделать ее больше не позволили технологические возможности). Кроме того, вносимые потери могут быть существенно снижены заменой Al на обычно используемые в мировой практике Ti (70 нм) + Au (3 мкм). Данная схема металлизации является основной во всех ведущих зарубежных фирмах, разрабатывающих данные устройства. Однако отсутствие технологического обеспечения по созданию металлизации на основе золота с подслоем титана не позволило сделать это в настоящей работе.

К преимуществам разработанного фазовращателя относятся низкие токи потребления (ниже 1 мкА) и точность установки фазы, зависящая от точности установки управляющего напряжения. Управляющее напряжение может быть снижено (менее 20 В) при использовании встречноштыревых конденсаторов с зазором 1 мкм.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сформированы две группы монокристаллических наноразмерных сегнетоэлектрических пленок титаната бария — стронция $\text{Ba}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{TiO}_3$, отличающихся условиями получения. Одна группа, полученная путем осаждения пленок по механизму

Франка–Ван дер Мерве (слоевой механизм роста), характеризуется постоянной элементарной ячейки $c \sim 0.3989$ нм. Вторая — по механизму Вольмера–Вебера (блочный механизм роста), имеет постоянную $c \sim 0.4037$ нм. Установлена связь между структурными и электрофизическими свойствами плёнок, что позволяет корректно сформулировать требования к условиям проведения измерений. Исследование температурных зависимостей поляризации пленок подтверждает наличие сильного размытия фазового перехода в наноразмерных сегнетоэлектрических пленках титаната бария–стронция (в отличие от объемных образцов аналогичного состава). Установлено, что электрофизические характеристики планарной структуры с тонкой сегнетоэлектрической пленкой титаната бария–стронция качественно зависят от величины параметра элементарной ячейки. Отмечена опосредованная связь коэффициента управляемости пленочных конденсаторов с поляризацией пленок. Приведены характеристики фазовращателя, реализованного на основе наноразмерных тонких пленок ($\text{Ba}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}$) TiO_3 . Дальнейшее улучшение параметров будет определяться более глубоким пониманием физических процессов, проходящих в гетероструктурах на основе наноразмерных сегнетоэлектрических пленок.

Работа выполнена в рамках реализации государственного задания ЮНЦ РАН по проекту № 122020100294-9.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вендик О.Г., Парнес М.Д. Антенны с электрическим сканированием. Введение в теорию. Сайнс-Пресс, 2002. 232 с.
2. Romanofsky R. // Proc. IEEE Spec. Iss. Tech. Adv. Deep Space Commun. Track. 2007. V. 95. No. 10. P. 1968.
3. Romanofsky R., Toonen R.C. // Multidimens. Syst. Signal Process. 2018. V. 29. No. 2. P. 475.
4. Steetr N., Damajanovic D., Eng L. et al. // J. Appl. Phys. 2006. V. 100. Art. No. 051606.
5. Sazegar M., Zheng Y., Maune H. et al. // IEEE Trans. Microw. Theory Tech. 2011. V. 59. No. 5. P. 1265.
6. Haghzadeh M., Jaradat H.M., Armiento C., Akyurtlu A. // Prog. Electromag. Res. 2016. V. 62. P. 167.
7. Брехов К.А., Лавров С.Д., Ильин Н.А. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2013. Т. 77. № 10. С. 1539.
8. Mishra M., Das N.R., Morichetti F. // Appl. Optics. 2020. V. 59. No.14. P. 4385.
9. Geler-Kremer J., Eltes F., Stark P. et al. // Nature Photon. 2022. V. 16. P. 491.
10. Aldrigo M., Tasolamprou A.C., Vasilache D. et al. // Phys. Rev. Appl. 2023. V. 20. No. 4. Art. No. 044067.
11. Qian Z., Zhou J., Wang H. et al. // Comput. Mater. 2023. V. 67. No. 9. Art. No. 41524.
12. Gagarin A., Platonov R., Legkova T., Altynnikov A. // Crystals. 2021. V. 11. P. 538.
13. Ruan H., Saunders T.G., Giddens H. et al. // J. Adv. Ceram. 2023. V. 12. No. 8. P. 1521.
14. Abdulazhanov S., Le Q.H., Huynh D.K. et al. // ACS Appl. Electron Mater. 2023. V. 5. No. 1. P. 189.
15. Tumarkin A., Altynnikov A., Platonov R. et al. // Ferroelectrics. 2023. V. 612. No. 1. P. 114.
16. Мухортов В.М., Сысоев В.К., Масычев С.И. // Ракет.-косм. приборостр. и информ. сист. 2023. Т. 10. № 3. С. 92.
17. Мухортов В.М., Головки Ю.И., Бiryukov С.В. и др. // ЖТФ. 2016. Т. 86. № 1. С. 93; Mukhortov V.M., Golovko Y.I., Biryukov S.V. et al. // Tech. Phys. 2016. V. 61. No 1. P. 91.
18. Mishina E., Grishunin K., Bilyk V. et al. // Ferroelectrics. 2018. V. 532. P. 199.

Influence of polarization of nanosized films of barium-strontium titanate on the characteristics of ferroelectric phase shifters of the microwave range

V. M. Mukhortov^{1,*}, S. V. Biryukov, Y. I. Golovko, S. I. Masychev

¹Federal Research Center Southern Scientific Center of the Russian Academy of Sciences,
Rostov-on-Don, 344006, Russia

* e-mail: mukhortov1944@mail.ru

The features of the behavior of polarization and tunability of thin ferroelectric films of barium-strontium titanate in a wide temperature range for two groups differing in production conditions are considered. An indirect connection between the tunability coefficient of film capacitors and the polarization of films has been noted.

Keywords: ferroelectric film, tunability, planar capacitor, ferroelectric phase shifter