

## Характеризация плёнок $Ba_xSr_{1-x}TiO_3$ на полуизолирующем карбиде кремния для сверхвысокочастотных применений.

А.В. Тумаркин, А.Р. Карамов, Е.Н. Сапего, А. Богдан, О.Е. Зайцев, И.Н. Закасовский

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»

**Аннотация:** Тонкие пленки  $Ba_xSr_{1-x}TiO_3$  (BST) выращены методом магнетронного распыления на подложках полуизолирующего карбида кремния. Представлены результаты исследования структуры полученных пленок, а также электрофизических параметров планарных конденсаторов на их основе. Управляемость конденсаторов достигает 2.3 при добротности не хуже 40 на частоте 2 ГГц. Конденсатор демонстрирует стабильные характеристики при отсутствии перегрева при подаче СВЧ сигнала с плотностью мощности до 125 Вт/мм<sup>2</sup>.

**Ключевые слова:** сегнетоэлектрические пленки, титанат бария-стронция, карбид кремния, СВЧ, высокоомощные применения

На сегодняшний день одной из наиболее стремительно развивающихся областей современной техники является электроника сверхвысоких частот (СВЧ). На частотах выше 1 ГГц работают радарные системы, устройства скоростной передачи данных, системы глобального позиционирования, спутниковая и сотовая связь. Важно отметить, что по мере развития СВЧ техники также и растет запрос на увеличение пропускной способности и рабочей мощности современных телекоммуникационных систем.

В настоящее время разработка электронных схем и узлов, работающих в СВЧ диапазоне электромагнитных волн, ведется, в основном, на базе полупроводниковых и ферритовых материалов. Однако, возможности современной полупроводниковой технологии ограничены для применений, связанных с необходимостью работы при повышенных уровнях мощности, когда неизбежно возникают паразитные электрические и тепловые нелинейные эффекты, приводящие к деградации характеристик устройств [1]. Кроме того, сложность интегральной полупроводниковой технологии обуславливает ее дороговизну. С другой стороны, мощные ферритовые СВЧ устройства демонстрируют низкое быстродействие и высокое энергопотребление, что ухудшает характеристики приборов на их основе.

В последнее время появились микроэлектромеханические (МЭМ) СВЧ устройства, обладающие высокой добротностью и сравнительно малым энергопотреблением. Однако они обладают недостатками механических систем – малым быстродействием и сроком службы. В связи с чем одной из наиболее актуальных задач является поиск альтернативных материалов для СВЧ применений.

Одной из таких альтернатив может стать использование пленочных сегнетоэлектрических (СЭ) материалов на подложках с высокой теплопроводностью для разработки мощных СВЧ приборов. По мере увеличения рабочей мощности наиболее остро встает вопрос об отводе тепла из активной зоны устройства. Одним из наиболее эффективных способов для отвода тепла является использование подложек с высоким коэффициентом теплопроводности [2]. В представленной работе предлагается использовать полуизолирующий карбид кремния. Данный материал обладает высокой теплопроводностью 300 – 400 Вт/(м·К), высокой электрической и механической прочностью [3]. В связи с чем целью данной работы является разработка

технологии осаждения пленок BST на подложки из полупроводящего карбида кремния и исследование их структурных и электрофизических свойств.

В работе использовался карбид кремния политипа бН качества “epiready”. Данные подложки изготавливались из монокристаллических слитков, выращенных методом газофазного транспорта и осаждения в ЗАО “Светлана-Электронприбор”. Подложки обладали удельным сопротивлением  $2.7 \cdot 10^{11} \text{ } \Omega \cdot \text{см}$ , потери на частоте 6 ГГц составляли  $\sim 10^{-4}$ , шероховатость поверхности – менее 1 нм.

Пленки осаждались методом высокочастотного магнетронного распыления в среде чистого  $\text{O}_2$ . Давление в рабочей камере варьировалось от 2 до 10 Па, температура подложки менялась в диапазоне от 700 до 900°C. Итоговая толщина пленки была равна 300 нм. Для некоторых образцов в ходе роста плёнки проводился промежуточный отжиг: после нанесения слоя заданной толщины разряд выключался и выполнялась термообработка при повышенных значениях давления и/или температуры подложки. Данный процесс повторялся 6 раз до достижения необходимой толщины пленки.

Кристаллическая структура полученных пленок исследовалась с помощью метода рентгеновской дифракции с использованием дифрактометра DRON-6 (“Буревестник” Санкт-Петербург, Россия). Исходя из полученных результатов, можно сделать вывод о существенном влиянии температуры подложки на стехиометрию получаемых пленок. Наилучшим структурным совершенством, а именно преимущественной кристаллографической ориентацией ( $h00$ ) и отсутствием вторичных фаз, а также наиболее близким к мишени фазовым составом обладали пленки, полученные при температуре подложки 900°C с применением промежуточного отжига.

В ходе работы также исследовались электрофизические характеристики планарных конденсаторов на основе полученных пленок. В качестве электрода использовалась медь с подслоем из хрома. Металлизация наносилась методом термического испарения. Выявление нелинейных электрических и тепловых эффектов проводилось путем подачи сигнала высокой мощности на СВЧ резонатор с СЭ элементом и анализа влияния амплитуды этого сигнала на положение и форму резонансной кривой. Смещение резонансной частоты пересчитывалось в изменение емкости, которое, в свою очередь, разделялось на электрическую и тепловую составляющие. Управляемость полученных конденсаторов достигала 2,3 при добротности не менее 40 на частоте 2 ГГц. Активная область конденсаторов выдерживала мощность вплоть до 125 Вт/мм<sup>2</sup>.

Данная работы выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках гранта FSEE-2025-0010.

#### Список литературы

1. Gharsalli S. et al. A comprehensive review on phase shifters: Topologies, types, comparative studies, liquid metal phase shifters, and future directions. – 2024.
2. Gustrau F. RF and microwave engineering: fundamentals of wireless communications. – John Wiley & Sons, 2025.
3. She X. et al. Review of silicon carbide power devices and their applications // IEEE transactions on industrial electronics. – 2017. – Т. 64. – №. 10. – С. 8193-8205.