

**А.В. Тумаркин, С.В. Разумов, М.М. Гайдуков,
А.Г. Гагарин, А.Б. Козырев**

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

Сегнетоэлектрические вариконды для высокочастотных и сверхвысокочастотных применений

В работе исследованы электрофизические свойства сегнетоэлектрических пленочных варикондов в широком частотном и температурном диапазонах. Предложены конструкции электрически управляемых емкостных элементов номиналом 1 – 500 пФ для использования на частотах 1 КГц – 4 ГГц на основе пленок титаната бария-стронция.

Ключевые слова: сегнетоэлектрические пленки, титанат бария-стронция, вариконды

В настоящее время, полупроводниковые устройства и микроэлектромеханические системы (МЭМС), используемые в высокочастотных (ВЧ) и сверхвысокочастотных (СВЧ) приборах, обладают рядом недостатков, препятствующих их использованию для ряда ключевых применений (входные цепи трансиверов, перестраиваемые устройства согласования импедансов, фазированные антенные решетки и ряд других). Важнейшими недостатками являются малая рабочая мощность полупроводниковых элементов, низкое быстродействие и высокие управляющие напряжения МЭМ элементов.

Одним из путей радикального улучшения характеристик таких ВЧ-СВЧ устройств является использование в них нелинейных диэлектрических (сегнетоэлектрических) материалов, элементы на базе которых избавлены от вышеуказанных недостатков.

Основным свойством сегнетоэлектриков, благодаря которому они представляют интерес для ВЧ-СВЧ применений, является высокая диэлектрическая проницаемость, зависящая от внешнего электрического поля. К преимуществам сегнетоэлектриков можно отнести высокое быстродействие ($\leq 10^{-11}$ сек.), малые потери, высокие рабочие мощности при малом потреблении энергии по цепям управления, высокую радиационную стойкость и возможность получения емкостных структур экстремально высокой плотности емкости на единицу площади [1-4].

Среди исследуемых сегодня сегнетоэлектриков наиболее привлекательны для использования на высоких и сверхвысоких частотах оксидные материалы типа перовскита. Важная особенность таких сегнетоэлектриков – это способность образовывать многокомпонентные твердые растворы, что позволяет создавать материалы, электрофизические свойства которых изменяются в широких пределах. Наиболее перспективным сегнетоэлектрическим материалом представляется твердый раствор титаната бария-стронция ($Ba_xSr_{1-x}TiO_3$), диэлектрическая проницаемость которого меняется от 300 до 4000 при изменении параметра x от 0 до 0.6, при этом материал остается в параэлектрическом состоянии при комнатной температуре [5].

В данной работе исследованы планарные и плоскопараллельные конденсаторные структуры на основе пленок твердого раствора титаната бария-стронция $Ba_{0,3}Sr_{0,7}TiO_3$. Согласно результатам предыдущих исследований данный состав обеспечивает наилучшие

электрофизические характеристики сегнетоэлектрических пленок для применения на СВЧ [5-7].

Конструкции исследуемых структур приведены на рисунках 1 (планарный вариконд) и 2 (плоскопараллельный вариконд).

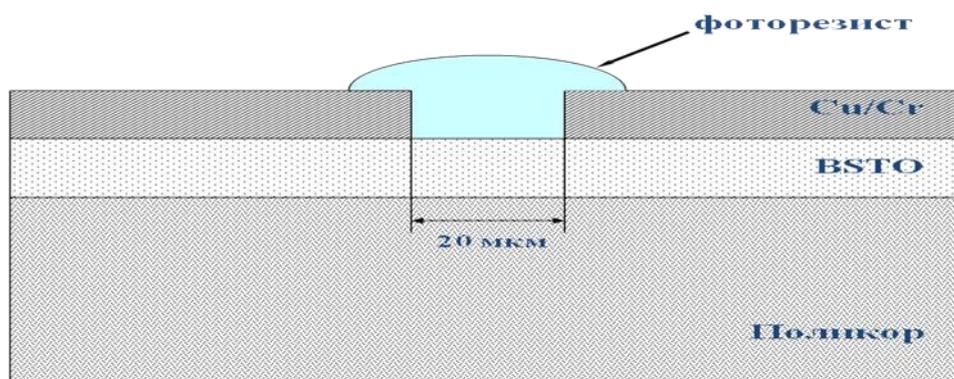


Рисунок 1

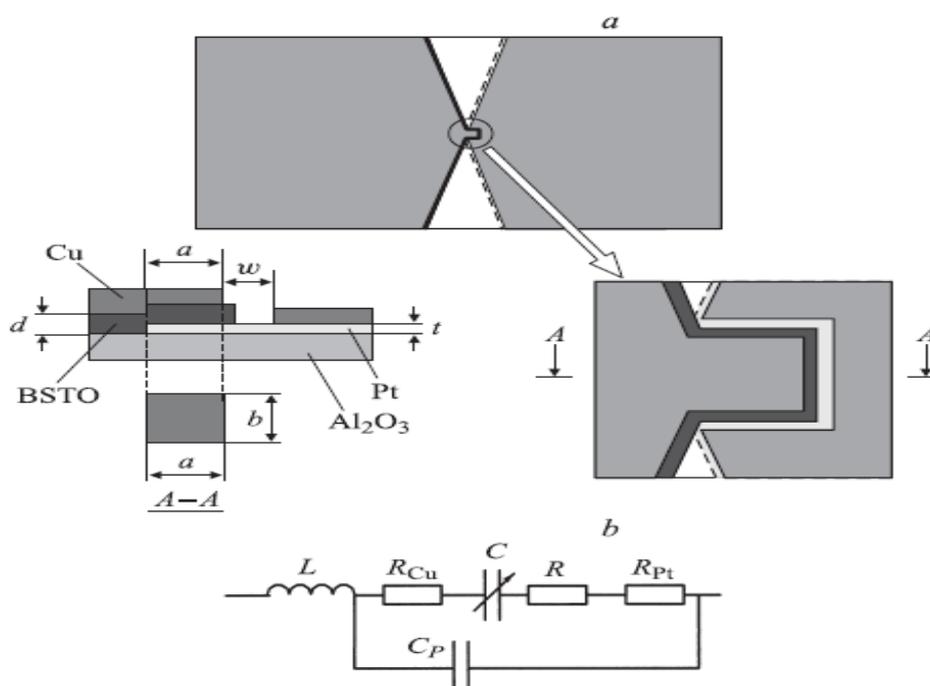


Рисунок 2

Пленки платины, используемые в качестве нижнего электрода в плоскопараллельной конструкции «металл-сегнетоэлектрик-металл», осаждались методом ионно-плазменного распыления на постоянном токе. Топология нижних электродов формировалась методами фотолитографии и ионного травления.

Пленки BSTO осаждались методом высокочастотного магнетронного распыления керамической мишени $Ba_{0,3}Sr_{0,7}TiO_3$. В качестве рабочего газа использовался кислород. После осаждения СЭ плёнки проводилась её литография путём химического травления в смеси кислот $HF-HNO_3$. Условия, при которых производилось осаждение пленок, приведены в таблице 1.

Таблица 1

Диаметр мишени	76 мм
Материал подложки	Al ₂ O ₃ и Al ₂ O ₃ /Pt
Мощность ВЧ разряда	~ 200 Вт
Давление рабочего газа	2 Па
Толщина пленок	100 – 2000 нм
Температура подложки	600 – 900°C
Скорость роста пленок	3 – 40 Å/мин

Верхний электрод формируется на завершающей стадии создания конденсаторных структур, поэтому основными требованиями к материалу являются хорошая адгезия и электропроводность. Слой меди (Cu) формировался термическим испарением металлической мишени.

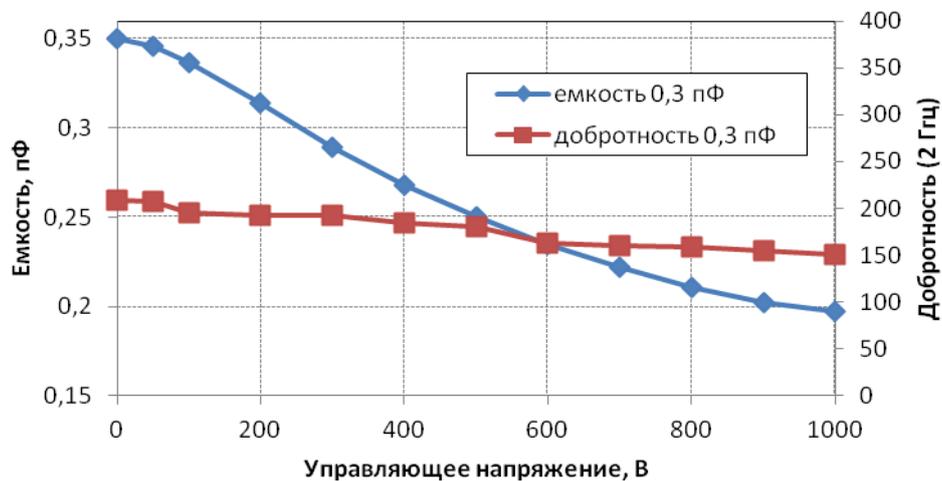


Рисунок 3 (а)

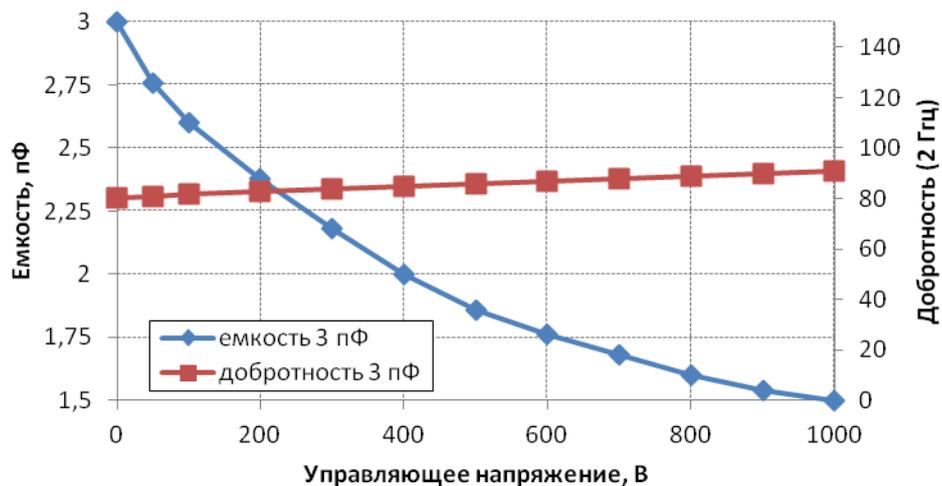


Рисунок 3 (б)

Измерения ВЧ-СВЧ характеристик (ёмкость C и добротность Q при управлении) конденсаторов были проведены с помощью резонансных методов [3]. На рис.3 (а) и (б)

представлены значения C и Q в зависимости от приложенного напряжения для планарных варикондов, предназначенных для использования на частотах ~ 1 ГГц при повышенной СВЧ мощности. Величина управляемости $K=C(0)/C(U_{упр})$ достигает 1,75 - 2 при подаче напряжения 1000 В. При этом добротность вариконда зависит от конфигурации электродов (см. рис. 3 (а) – планарный вариконд с линейным зазором и рис. 3. (б) – вариконд с встречно-штыревой конфигурацией электродов). Ширина зазора в обоих случаях составляет 20 мкм.

На рис.4 представлены значения C и Q для плоскопараллельных варикондов, предназначенных для использования на частотах ~ 1 ГГц при малом управляющем напряжении. Также на рис. 4 представлен параметр быстродавления $\Delta C/C_0$ (невозврат ёмкости), который отображает ёмкость вариконда через 100 мс после снятия управляющего напряжения.

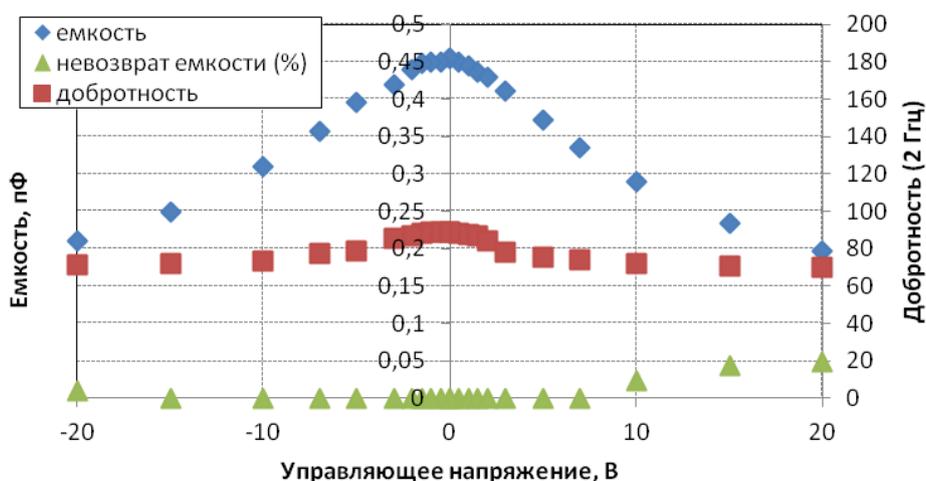


Рисунок 4

Хорошо видно, что достижение управляемости 2 сопровождается невозвратом ёмкости на величину, не превышающую 5%, что допустимо для применения в устройствах с быстрым переключением.

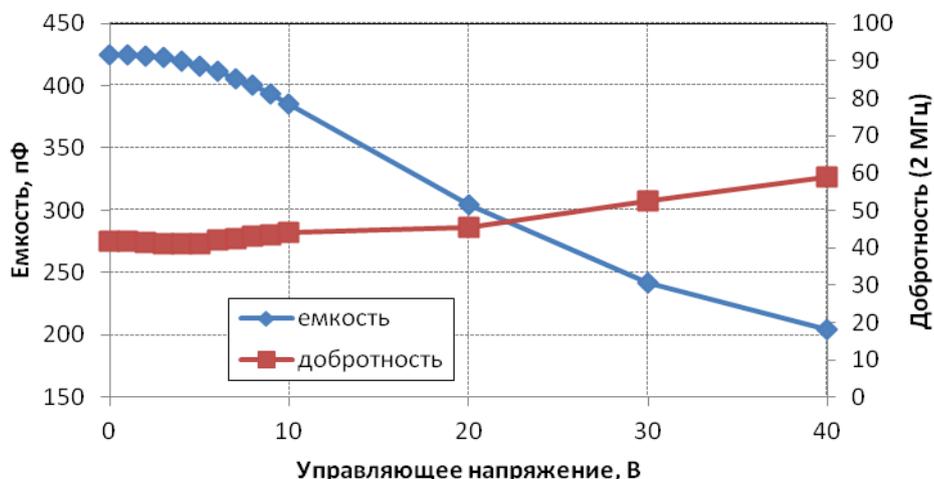


Рисунок 5

На рис. 5 приведены значения C и Q сегнетоэлектрических плоскопараллельных варикондов высокого номинала емкости, предназначенных для использования на частотах ~ 1 КГц – 1 МГц.

В результате проведенных исследований разработана технология осаждения сегнетоэлектрических пленок на различные подложки, предложены конструкции варикондов различных номиналов емкости для ВЧ и СВЧ применений. Сочетание высокой управляемости и высокой добротности делает сегнетоэлектрические вариконды перспективной альтернативой полупроводниковым и МЭМС аналогам.

Библиографический список

1. Tagantsev A.K. Ferroelectric Materials for Microwave Tunable Applications / A.K.Tagantsev, V.O. Sherman, K.F. Astafiev, J. Venkatesh, N. Setter // Journal of Electroceramics, -2003. Vol.11. -P.5–66
2. Seung Eon Moon X-Band Phased Array Antenna Using Ferroelectric (Ba, Sr) TiO₃ Coplanar Waveguide / Seung Eon Moon, Han Cheol Ryu, Min Hwan Kwak, Young Tae Kim, Su-Jae Lee, and Kwang-Yong Kang // ETRI Journal, -2005. Vol.27, №6. -P.603-612
3. Kozyrev A. Millimeter-wave loaded line ferroelectric phase shifters / A.Kozyrev, A.Ivanov, O.Soldatenkov, A.Tumarkin, S.Ivanova, T.Kaydanova, J.D.Perkins, J.Alleman, D.S.Ginley, L.Sengupta, L.Chiu, and X.Zhang // Integrated Ferroelectrics, -2003. -Vol.55. -P.847-852
4. Weicheng Zhu Enhanced tunable properties of Ba_{0.6}Sr_{0.4}TiO₃ thin films grown on Pt/Ti/SiO₂/Si substrates using MgO buffer layers / Weicheng Zhu, Jinrong Cheng, Shengwen Yu, Jia Gong, and Zhongyan Meng // Appl. Phys. Lett., -2007. -Vol.90. -P.65-69
5. Razumov S.V. Characterisation of quality of Ba_xSr_{1-x}TiO₃ thin film by the commutation quality factor measured at microwaves / S.V. Razumov, A.V. Tumarkin, M.M. Gaidukov, A.G. Gagarin, A.B. Kozyrev, O.G. Vendik, A.V. Ivanov, O.U. Buslov, V.N. Keys L.C.Sengupta and X. Zhang // Appl. Phys. Lett., -2002. -Vol.81. -P.1675-1677
6. Тумаркин А.В. Влияние температуры осаждения на структурные и электрофизические свойства тонких пленок титаната бария-стронция / А.В.Тумаркин, А.К.Михайлов, А.Г.Алтынников // ПЖТФ, -2008. -Т.34, -№18. -С.14-19
7. А.В. Тумаркин Сверхвысокочастотные свойства сегнетоэлектрических варикондов на основе пленок Ba_xSr_{1-x}TiO₃ с Mg-содержащей добавкой / А.В. Тумаркин, Е.Р. Тепина, Е.А. Ненашева, Н.Ф. Картенко, А.Б. Козырев // ЖТФ. 2012. Т. 82. Вып 6. С. 53-56