

UOT 538.9

**A.Ə.Nəbiyev**

*Azərbaycan dövlət pedaqogika universiteti*  
*asaf.fizik@mail.ru*

## ТЕМПЕРАТУРНЫЕ И ЧАСТОТНЫЕ ДИСПЕРСИИ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МДП СТРУКТУР

<https://doi.org/10.30546/2520-2049.72.3.2024.327>

**Ключевые слова:** *метал-диэлектрик-полупроводник, сегнетоэлектрические пленки, частотная зависимость, температурная зависимость, диэлектрическая проницаемость*

Показано, что при низких частотах приложенного напряжения все свободные дипольные элементы в этих образцы легко ориентируются по полю (ориентационная поляризация) и формируют высокие значения диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь), при этих частотах. При высоких частотах дипольные элементы не успевают за полем, их ориентация затрудняется, осцилляция замедляется и ориентационная поляризация исчезает, что приводит к уменьшению диэлектрической проницаемости, в том числе тангенса угла диэлектрических потерь. Из анализа зависимостей проводимости от температуры и частоты, в переменном электрическом поле, исследуемых образцов выявлено, что здесь проводимость имеет прыжковый характер.

**A.Ə.Nəbiyev**

## MDU STRUKTURLARININ ELEKTROFİZİKİ XASSƏLƏRİNİN TEMPERATUR VƏ TEZLİK DİSPERSİYASI

**Açar sözlər:** *metal-dielektrik-yarımkeçirici, seqnetoelektrik təbəqələr, dielektrik nüfuzluğu, tezlik asılılığı, temperatur asılılığı*

Göstərilmişdir ki, tətbiq olunan gərginliyin aşağı tezliyində nümunədəki sərbəst dipol elementlərinin hamısı sahə istiqamətində asanlıqla nizamlanaraq əmin tezlikdə dielektrik nüfuzluğunun və dielektrik itkisinin tangens bucağı üçün yüksək qiymətlər formalaşdırır. Böyük tezliklərdə isə dipol elementləri sahə istiqamətində nizamlanması çətinləşir, ossilyasiya yavaşlayır və nizamlanma polyarlaşması itir, bu da dielektrik nüfuzluğunun və dielektrik itkisinin tangens bucağının azalmasına gətirib çıxarır. Dəyişən elektrik sahəsində tədqiq edilən nümunənin keçiriciliyinin temperatur və tezlik asılılığının analizindən müəyyən edilmişdir ki, keçiricilik sıçrayışlı xarakter daşıyır.

*A.A.Nabiev*

## TEMPERATURE AND FREQUENCY DISPERSION OF ELECTROPHYSICAL PROPERTIES OF MSU STRUCTURES

**Keywords:** *metal-insulator-semiconductor, ferroelectric films, frequency dependence, temperature dependence, permittivity*

It is shown that at low frequencies of the applied voltage, all free dipole elements in these samples are easily oriented along the field (orientational polarization) and form high values of permittivity and dielectric loss tangent) at these frequencies. At high frequencies, the dipole elements do not keep up with the field, their orientation is hindered, oscillation slows down and orientational polarization disappears, which leads to a decrease in permittivity, including the dielectric loss tangent. From the analysis of the dependences of conductivity on temperature and frequency, in an alternating electric field, the studied samples revealed that here the conductivity has a hopping nature.

### Введение

В настоящее время одним из перспективных направлений современного материаловедения является создание новых многофункциональных материалов. В последние годы наметился резкий рост исследований, направленных на разработку сегнетоэлектрической энергонезависимой памяти с произвольным доступом [3, 11]. Такие материалы успешно применяются в сверхвысокочастотной (СВЧ) электронике, в том числе в высоковольтной импульсной технике. В связи с этим, вопрос применения сегнетоэлектриков в качестве высокоэнергосодержательного материала в области электронных устройств является актуальным. По этому, применение сегнетоэлектрических пленок в последнее время стало расширяться быстрыми темпами. Следует отметить, что в современной микроэлектронике большой практический интерес представляют собой переходом СВЧ электроники. В связи с этим, из области специальных применений в разряд массового потребления, так как сотовая телефония, спутниковое телевидение, акустоэлектронные устройства и т.д., глобальная информационная сеть [2, 9, 12, 13]. При информации электрофизических свойств ( $C$ ,  $R$ ,  $\rho_v$ ,  $\sigma$ ,  $\epsilon$ ,  $\tan\delta$ ) многослойных гетероструктур, в том числе большими значениями высокой диэлектрической проницаемостью содержащих пленки сегнетоэлектриков, в том числе  $\text{BaSrTiO}_3$  существенно играют особым важным роль, в том числе измерениями диэлектрических свойств показывает, что полученные структуры являются перспективными для построения спин-волновых устройств обработки СВЧ-сигналов [3, 8, 12]. В связи с этим, при разработке новых многофункциональных

сегнетоэлектрических материалов необходимо имеет информацию о температурной и частотной дисперсии действительной ( $\epsilon'$ ) и мнимой ( $\epsilon''$ ) части комплексной диэлектрической проницаемости ( $\epsilon$ ), тангенса угла диэлектрических потерь ( $\operatorname{tg}\delta$ ), электропроводности на постоянном ( $\sigma_{ac}$ ) и переменном ( $\sigma_{ac}$ ) электрическом поля и основных закономерностях изменения этих параметров и спектра диэлектрической релаксации.

Следует отметить, что в работе [2] показано, что планарный конденсатор в СВЧ устройствах средней мощности работает в жестких температурных условиях, в том числе на основании расчетов проведена оценка критических режимов эксплуатации конденсатора на частотах 3÷15 ГГц при различной мощности.

Цель настоящей работы – исследования электрофизические свойств  $\text{BaSrTiO}_3$  частотных (25-10<sup>6</sup> Гц) и температурных (293-473 К) зависимости в переменном электрическом поля.

### Методика экспериментов

Исследованы электрофизические свойства ( $C$ ,  $R$ ,  $\rho_v$ ,  $\sigma$ ,  $\epsilon$ ,  $\operatorname{tg}\delta$ ) образца  $\text{BaSrTiO}_3$  при частотных (25-10<sup>6</sup> Гц) и температурных (293-473 К) зависимостей в переменном электрическом поля. Проводили измерения прибором измерителя иммитанса Е7-20 [1]. Значения диэлектрической проницаемости рассчитывались исходя из толщины диэлектрического слоя и емкости конденсаторной структуры, в том числе затем на основании измеренных значений указанных параметров и геометрических размеров образцов стандартными методами определяли величину  $\epsilon'(\epsilon' = c \cdot d / \epsilon_0 \cdot S)$ , где  $S$  – площадь плоского образца,  $d$  – толщина пленки), и мнимой  $\epsilon''(\epsilon'' = \epsilon' \operatorname{tg}\delta)$  частей комплексной диэлектрической проницаемости и значение электропроводности ( $\sigma = \frac{1}{R} \cdot \frac{h}{S}$ , где  $R(\text{Ом})$  – сопротивление образца) измерительной ячейки с образцом.

### Экспериментальные результаты и их обсуждение

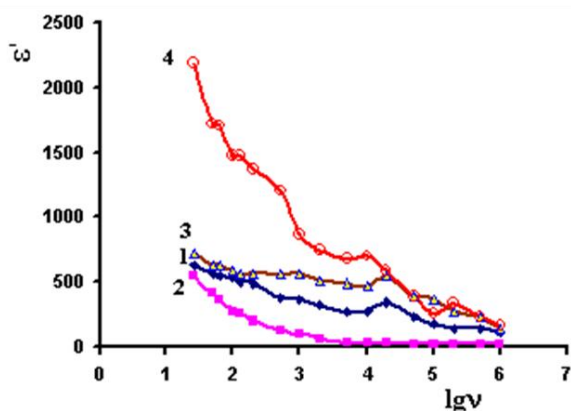
Известно, что механические напряжения могут оказывать существенное влияние на температурную зависимость диэлектрической проницаемости  $\epsilon(T)$ , а также измерениями диэлектрических свойств ( $\operatorname{tg}\delta = f(T)$ ), показывает, что полученные структуры являются перспективными для построения спин-волновых устройств обработки СВЧ-сигналов. Следует отметить, что каждый сегнетоэлектрический материал имеет ряд своеобразных электрофизических свойств. Как известно [3, 5, 8] сегнетоэлектриками называют полярные диэлектрики, которые в определенном интервале температур обладают спонтанной

поляризацией. При получении сегнетоэлектрических материалов, одним из существенных важных заданий является прогнозирование воздействий внешних факторов (внешних электрических поля, температур, давление, влажность, ионизирующим излучением и др.). Электрофизические параметры сегнетоэлектрических материалов, в том числе  $\text{BaSrTiO}_3$  зависит от частоты переменного электрического поля ( $\nu$ ) и температуры ( $T$ ).

На рис. 1 и 2 представлены зависимости  $\varepsilon' = f(\lg \nu)$  и  $\text{tg} \delta = f(\lg \nu)$ . Здесь для образцов 3КЭФ, в частотном интервале 25-10<sup>6</sup> Гц, величина действительной части диэлектрической проницаемости  $\varepsilon'$  при 25 Гц равно 637, а при 1 МГц, 116 (кривая 1). Эта разница равна  $\Delta \varepsilon' = 521$ , а соотношение составляет ~5,5 раза. Это можно сказать также про  $\text{tg} \delta$ . Так, для того же образца (3КЭФ) разница равна  $\Delta \text{tg} \delta = 1,61$ , а соотношение составляет ~48 раза. Это можно сказать и для других исследуемых образцов.

Можно также отметить, что при производстве приборов для электроники роль диэлектриков, в том числе сегнетоэлектриков велика. Поэтому, при изготовлении этих приборов учитывается величина тангенса угла диэлектрических потерь  $\text{tg} \delta$ , и низкий показатель этой величины является одним из важных задач. Например, в работе [2,12] показано, что при частоте 15 МГц  $\text{tg} \delta = 2 \cdot 10^{-5}$ , а при 19 МГц  $\text{tg} \delta = 10^{-5}$ . В другой работе [1] при частоте 10<sup>6</sup> Гц  $\text{tg} \delta = 0,06$ . На исследуемых нами образцах, при частоте 10<sup>6</sup> Гц получены следующие значения: для образцов 3КЭФ  $\text{tg} \delta = 0,0346$ , 3КДБ  $\text{tg} \delta = 0,08$ , 4КЭФ  $\text{tg} \delta = 0,0361$  и 4КДБ  $\text{tg} \delta = 0,09$ . Эти результаты соответствуют значениям  $\text{tg} \delta$  приведенных в работе [1].

В литературе [4, 5] показано, что на величину  $\text{tg} \delta$  дают вклад различные процессы рассеяния; учет этих вкладов важен при исследовании и разработке СВЧ-диэлектриков с низкими потерями. Наблюдаемые на рис. 1 и 2 максимумы могут быть связаны с резонансной поляризацией. В заключении можно сказать, что для значений диэлектрической



**Рис 1.** Частотная зависимость действительной. части диэлек. проницаемости пленок  $\text{Ba}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{TiO}_3$   
1-3КЭФ, 2-3КДБ, 3- 4КЭФ, 4-4КДБ

проницаемости  $\varepsilon'$  и тангенса угла диэлектрических потерь  $\operatorname{tg}\delta$  характерен снижение с низкой частоты в сторону высоких частот. Это дает возможность использовать этих сегнетоэлектриков в СВЧ-электронике, в том числе в высоковольтной импульсной технике.

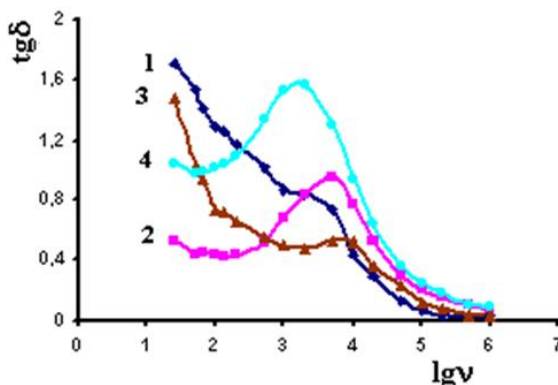
Все зависимости характеризует общее свойство-возрастание проводимости с ростом частоты. Видно, что для

всех образцов зависимость  $\sigma_{ac}(\nu)$  в логарифмических координатах обнаруживает два линейных участка.

Это свидетельствует о степенной зависимости проводимости от частоты. Согласно [15-17] электропроводность образцов на переменном токе представляется как суммарный эффект dc – проводимости, обусловленная миграцией заряда и частотно-индуцированной диэлектрической дисперсии и описывается выражением

$$\sigma_{ac}(\nu) \approx \sigma_{dc} + A\omega^s, \quad (1)$$

Где  $\sigma_{dc}$ - проводимость на постоянном токе,  $\omega=2\pi\nu$ - угловая частота  $A$ - постоянное, зависящий от температуры  $T$ ,  $s$ -параметр, определяемый природой механизма проводимости и зависящий от температуры и частоты приложенного электрического поля. Известно, что для структурно-неоднородных твердых тел электрические свойства на переменном токе обладают определенной степенью общности [10]. Как правила [13], для многих неупорядоченных материалов, к которым относятся и исследованные нами образцы  $\text{BaSrTiO}_3$ ,  $0 < s < 1$ . Наличие линейных участков в зависимости  $\ln\sigma_{ac}=f(\ln\nu)$  согласно [15], говорит о прыжковом механизме переноса заряда. Из рис.3 видно, что для  $\text{BaSrTiO}_3$  и всех образцов на обоих участках параметр  $s < 1$ , что указывает на существование неомического переноса заряда. Для всех образцов выше определённой критической частоты  $\nu_c$  область сравнительно слабой зависимости  $\sigma_{ac}$  (I участок) переходит к более сильной области (II участок). Соответствующие значения  $\nu_c$  и параметра  $s$ , вычисленные по наклону линейных участков  $\sigma_{ac}(\ln\nu)=f(\ln\nu)$  (рис. 3). Спонтанная



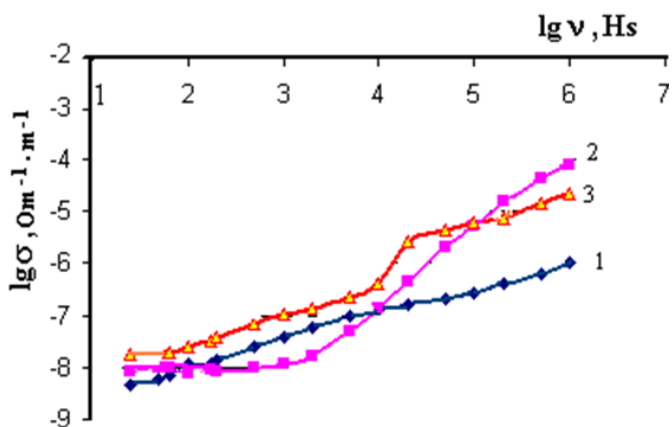
**Рис 2.** Частотная зависимость тангес угла диэлектрических потер пленок  $\text{Ba}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{TiO}_3$   
1-3КЭФ, 2-3КДБ, 3- 4КЭФ, 4-4КДБ

поляризация в сегнетофазе и миграционная поляризация, связанная с прыжковым характером движения носителей заряда по локализованным состояниям [10].

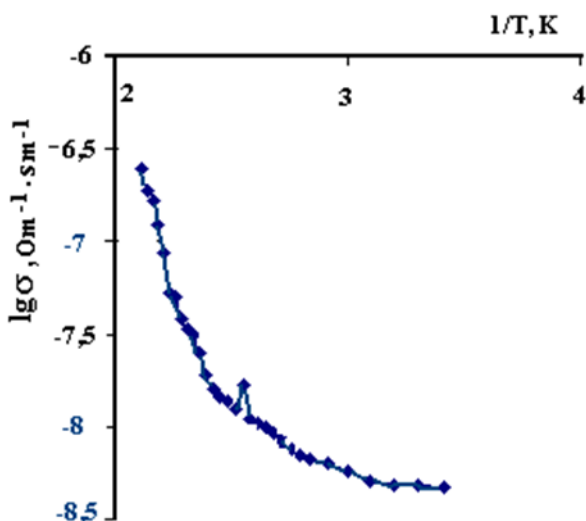
Известно, что электропроводность влияет на доменную структуру сегнетоэлектриков. В частности, получение однодоменных кристаллов обусловлено конкуренцией между скоростью роста сегнетоэлектрической фазы и изменением концентрации свободных носителей заряда при переходе кристалла из пара в сегнетоэлектрическую область. Если при этом поверхностный заряд граничных диполей может быть скомпенсирован свободными зарядами, то создаются необходимые условия для образования однодоменного кристалла [4].

В зависимости  $\lg \sigma = f(1/T)$  (рис. 4) для системы  $\text{BaSrTiO}_3$ , в том числе образца 3КЭФ наблюдается фазовый переход при температуре  $120^\circ\text{C}$  (две области). Температурные зависимости  $\lg \sigma = f(1/T)$  обычно представляют собой экспоненты, которые характерны для той или иной области. Иногда наблюдаются изломы линейных зависимостей  $\lg \sigma = f(1/T)$ , что связано с изменением энергии активации.

В сегнетоэлектриках типа  $\text{BaSrTiO}_3$ , имеется такая электронная проводимость. Таким образом, объяснения фазового перехода в



**Рис 3.** Частотная зависимость электропроводности пленок  $\text{Ba}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{TiO}_3$   
1-3КЭФ, 2-3КДБ, 3- 4КЭФ, 4-4КДБ



**Рис 4.** Температурная зависимость электропроводности пленок  $\text{Ba}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{TiO}_3$   
1-3КЭФ, 2-3КДБ, 3- 4КЭФ, 4-4КДБ

диэлектрике соскачком электронной проводимости могут быть различными. Разные экспериментальные случаи таких переходов объясняются с позиции различных теоретических моделей. Главное, что объединяет эти модели, неустойчивость электронного спектра диэлектриков, для которых наблюдается скачок проводимости. Важно отметить, что в некоторых случаях при фазовом переходе вместо скачка проводимости возникает весьма высокая поляризуемость и повышена диэлектрическая проницаемость [4, 5, 6]. Зависимости  $\lg \sigma = f(1/T)$  (рис.4) в районе точки Кюри наблюдается аномалия (скачок) электропроводности. Исследуемыми образец обладают характерны кислородно-октаэдрических сегнетоэлектриков. При переходе из сегнетоэлектрической в параэлектрическую фазу электропроводность скачком уменьшается, а энергия активации увеличивается (рис.4). Следует, отметить, что электропроводность полупроводников и диэлектриков имеет активационную природу: носители заряда генерируются в них термическим, радиационным, оптическим и другими путями. Поэтому наблюдаемые в эксперименте скачки обусловлены, очевидно, (рис.7, кр.1) фазовыми переходами. Если скачок проводимости имеет электронную природу, то, очевидно, что он вызывается фундаментальным изменением электронного спектра кристалла [4, 5, 6].

Поведение функции  $\varepsilon' = f(T)$ ,  $\lg \delta = f(T)$  и  $\lg \rho = f(T)$  (рис. 5, 6, 7) при нагрев - охлаждение может быть объяснено двояко: 1) либо перестройкой структуры вблизи точки Кюри ( $T_K$ ) этих максимумов характерно для сегнетоэлектриков связан с сегнетоэлектрическим фазовым переходом, наблюдаемые максимумов при температуре  $150^\circ\text{C}$  и  $180^\circ\text{C}$  характерно для сегнетоэлектриков связан спонтанная поляризация. Связи с этим в процессе нагревания

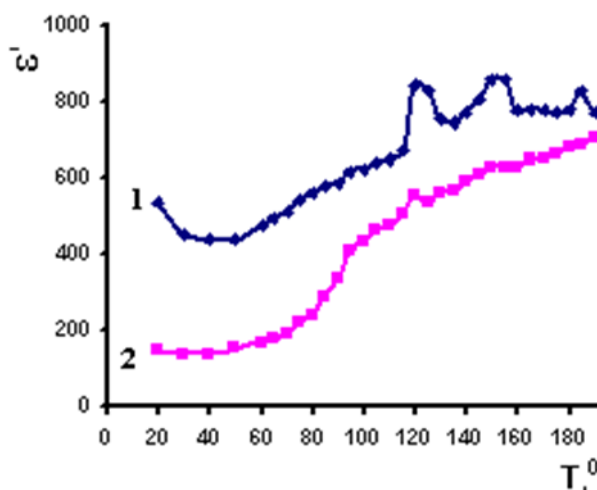
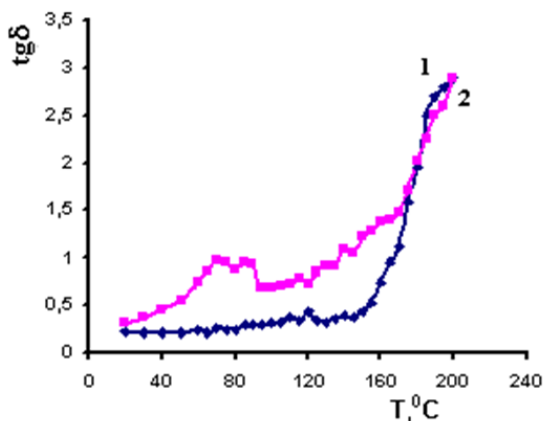
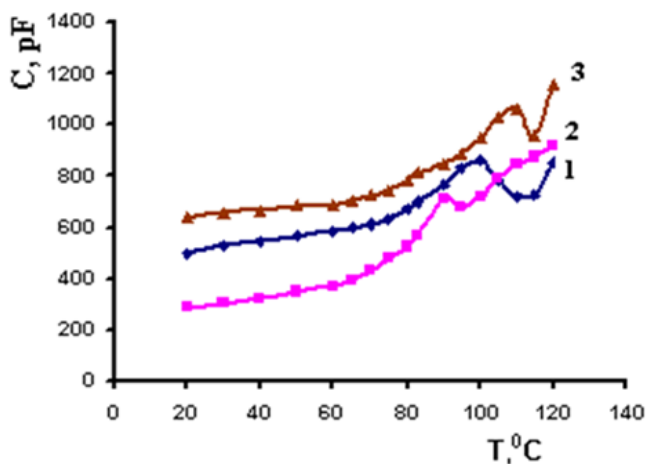


Рис 5. Температурная зависимость  $\varepsilon'$  пленок  $\text{Ba}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{TiO}_3$

диэлектрическая проницаемость ( $\epsilon$ ) зависимость от температуры может быть иметь один или несколько максимумов (рис.5 кр.1).2)) по другому сторону, либо эффектами «асимметрии» температурной эволюции электрически активных дефектов при нагревании и охлаждении. Отсутствие ярко выраженных гистерезисных процессов для  $\text{BaSrTiO}_3$  среды дает основание считать, что основным механизмом в нашем случае является эффект «асимметрии» температурной эволюции электрически активных дефектов [14]. Значение электрофизической параметров образца в результате нагрев-охлаждение принимает новое значение. Следует отметить, что наличие в кристалле дефектов существенно влияет на динамику доменных стенок и процессы поляризации. Следует отметить, возрастание  $\text{tg}\delta$  с ростом напряжения свидетельствует об отсутствии в этих образцах механизма потерь, обусловленного заряженными дефектами. При этом кислородные вакансии, которые всегда присутствуют в соединениях BSTO и создают заряженные дефекты, обуславливающие высокие значения  $\text{tg}\delta$ . Приблизненно влияние таких дефектов на свойства кристалла можно



**Рис 6.** Температурная зависимость тангес угла диэлектрических потер пленок  $\text{Ba}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{TiO}_3$  4КДБ (1-нагрев, 2-охлаждение)



**Рис. 7.** Температурная зависимость емкости образцов: 1-3КЭФ, 2-3КДБ, 3-4КДБ

поляризации. Следует отметить, возрастание  $\text{tg}\delta$  с ростом напряжения свидетельствует об отсутствии в этих образцах механизма потерь, обусловленного заряженными дефектами. При этом кислородные вакансии, которые всегда присутствуют в соединениях BSTO и создают заряженные дефекты, обуславливающие высокие значения  $\text{tg}\delta$ . Приблизненно влияние таких дефектов на свойства кристалла можно



описать как некоторого внутреннего «смещающего поля» [3]. Здесь, если обратить внимание на обратный процесс охлаждения, то можно увидеть, что в процессе нагрева образовавшийся при 150°C и 180°C пики исчезают. Это, можно также связать с удалением впитанной влаги из кристалла в процессе нагрева.

На рис.7 представлена зависимость электрической емкости  $C$  образцов (1-3КЭФ, 2-3КДБ, 3-4КДБ) от температуры для 1кГц частота. Из рисунка видно, что с увеличением температуры дисперсия резко увеличивается, происходит рост  $C$ , причем 100°C (кр.1), 90°C (кр.2) и 110°C (кр.3) наблюдается максимум. Можно считать, что данный максимум связан с сегнетоэлектрическим фазовым переходом. Это подтверждается локальными максимумами (70°C-140°C)(рис.6 кр.1) тангенса угла диэлектрических потерь на той же частоте (1кГц), такое поведение характерно для сегнетоэлектриков. Это соответствует данным работ [8, 10].

## ӘДӘБИҒАТ

1. Д.А.Голосов, С.М.Завадский, В.В.Колос, А.С.Турцевич. Сегнетоэлектрические свойства пленок легированного ниобием танталата стронция-висмута. ФТТ, 2016, том 58, вып. 1. с. 51-55
2. Г.В.Чучева, М.С. Афанасьев, И.А.Анисимов, А.И.Георгиева, С.А.Левашов, А.Э.Набиев. Определение планарных конденсаторов на основе тонкопленочных сегнетоэлектрических материалов. Известия Саратовского университета. Новая серия, 2012. Т.12. Сер.Физика, вып.2
3. Семенов А.А., Дедык А.И., Мыльников И.Л., Пахомов О.В., Богачев Ю.В., Князев М.Н., Павлова Ю.В., Белявский П.Ю. Исследование сегнетоэлектрических многослойных структур со свойствами мультиферроиков на основе пленок титаната бария-стронция. Физика твердого тела, 2015, том 57, вып.3, с.523-530.
4. Физика сегнетоэлектриков Современный взгляд. Под редакцией К.М.Рабе, Ч.Г.Ана, Ж.-М.Трискона. пер.англ. 3-е издание, 443с. Москва-2015.
5. Поплавко Ю.М., Переверзева Л.П., Раевский И.П. Физика активных диэлектриков. Ростов н /Д: Изд-во ЮФУ, 2009, 480с.
6. M.Afanasyev, A.Nabiev, G.V.Chucheva, J.I.Huseynov. Acquiring MIS Structures Based on Ba0. 8Sr0. 2TiO3 Ferroelectric Films and their Properties// Key Engineering Materials 781 (2018) 20. DOI:10.4028/www.scientific.net/KEM.781.20
7. Афанасьев М.С., Набиев А.Э., Чучева Г.В. Оптический мониторинг процесса осаждения сегнетоэлектрических пленок.

8. М.С.Иванов, М.С.Афанасьев. Особенности формирования тонких сегнетоэлектрических пленок  $Ba_{1-x}Sr_xTiO_3$  на различных подложках методом высокочастотного распыления. ФТТ, 2009, том 51, вып. 7.
9. A.O.Dashdemirov, J.I.Huseynov, R.F.Rzayev, Y.I.Aliyev. Thermophysical behavior in  $Y_2O_3$  under high intensity fast neutron irradiation // Modern Physics Letters B, Vol. 36, No. 20, 2250092 (2022); doi.org/10.1142/S0217984922500920
10. А.М.Солодуха, И.Е.Шрамченко, А.М.Ховиев, В.А.Логачева. Диэлектрические свойства пленок цирконата-титаната свинца, синтезированных окислением металлических слоев. ФТТ, 2007, том 49, вып.4., с.719-722.
11. Д.А.Киселев, М.С.Афанасьев, С.А. Левашов, Г.В.Чучева. Кинетика роста индуцированных доменов в сегнетоэлектрических тонких пленках  $Ba_{0.8}Sr_{0.2}TiO_3$ . ФТТ, 2015, том 57, вып.6., с.1134-1137.
12. M.S.Afanasiev, E.I.Goldman, G.V.Chucheva, A.E.Nabiev, J.I.Huseynov, N.Sh.Aliyev. Conductivity of metal–dielectric–semiconductor structures based on ferroelectric films // Physics of the Solid State 62(1) (2020) 121. DOI: 10.1134/S1063783420010035
13. В.В.Широков, В.В.Калинчук, Р.А.Шаховой, Ю.И.Юзюк. Физические свойства тонких пленок  $Ba_{0.8}Sr_{0.2}TiO_3$ . ФТТ, 2016, том 58, вып.10., с.1964-1968.
14. Соцков В.А., Борисов В.А. Эволюция аттрактора макросистемы в зависимости от концентрации приводящей фазы и температуры. ЖТФ, 2007, т.77, в.11, с.103-108.
15. A.E.Nabiev, J.I.Huseynov, I.I.Abbasov. Dielectric properties of  $Ba_{0.8}Sr_{0.2}TiO_3$  ferroelectric films in an alternating electric field // Canadian Journal of Physics, 2024, Vol. 102, Is. 6, pp. 325-331; DOI:10.1139/cjp-2023-0265
16. М.А.Кудряшов, А.И.Машин, А.А.Логунов, G.Chidichimo, G.DeFilpo. Частотная зависимости в нанокompозитах Диэлектрические свойства нанокompозитов Ag/ПАН. ЖТФ, 2012, т.82, в.7, с.69-74.
17. М.А.Кудряшов, А.И.Машин, А.А.Логунов, G.Chidichimo, G.DeFilpo. Диэлектрические свойства нанокompозитов Ag/ПАН. ЖТФ, 2014, т.84, в.7, с.67-71.

Redaksiyaya daxil olub 19.04.2024