

UOT 538.9

A.Э.Набиев

*Азербайджанский государственный педагогический
университет
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.Ә.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 formalasdırır. Böyük tezliklərdə isə dipol elementləri sahə istiqamətində nizamlanması çətinləşir, ossilyasiya yavaşdır 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.

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 настоящие времена 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. Связь с этим, из области специальных применений в разряд массового потребления, так как сотовая телефония, спутниковые телевидение, акустоэлектронные устройства и т.д., глобальная информационная сеть [2, 9, 12, 13]. При информации электрофизические свойства (C , R , ρ_v , σ , ε , $\operatorname{tg}\delta$) многослойных гетероструктур, в том числе большими значениями высокой диэлектрической проницаемостью содержащих пленки сегнетоэлектриков, в том числе 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]. Связь с этим, при разработке новых многофункциональных

сегнетоэлектрических материалов необходимо имеет информацию о температурной и частотной дисперсии действительной (ϵ') и мнимой (ϵ'') части комплексной диэлектрической проницаемости (ϵ), тангенса угла диэлектрических потерь ($\operatorname{tg}\delta$), электропроводности на постоянном(σ_{dc}) и переменном (σ_{ac}) электрическим 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÷15ГГц при различной мощности.

Цель настоящей работы – исследования электрофизические свойств BaSrTiO₃ частотных (25-10⁶ Гц) и температурных(293-473К) зависимости в переменным электрическим поля.

Методика экспериментов

Исследованы электрофизические свойства (C, R, ρ_v , σ , ϵ , $\operatorname{tg}\delta$) образцов BaSrTiO₃ при частотных (25-10⁶ Гц) и температурных (293-473К) зависимостей в переменным электрическим поля. Проводили измерения прибором измерителя иммитанса E7-20 [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 ϵ ($\epsilon = c \cdot d / \epsilon_0 \cdot S$, где S – площадь плоского образца, d – толщина пленки), и мнимой ϵ'' ($\epsilon'' = \epsilon' \operatorname{tg}\delta$) частей комплексной диэлектрической проницаемости значение электропроводности $\sigma = \frac{1}{R} \cdot \frac{h}{S}$, где R(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 BaSrTiO_3 зависят от частоты переменного электрического поля (v) и температуры(T).

На рис. 1 и 2 представлены зависимости $\epsilon'=f(\lg v)$ и $\operatorname{tg}\delta=f(\lg v)$. Здесь для образцов ЗКЭФ, в частотном интервале $25\text{-}10^6\text{Гц}$, величина действительной части диэлектрической проницаемости ϵ' при 25 Гц равно 637, а при 1МГц , 116 (кривая 1). Эта разница равна $\Delta\epsilon'=521$, а соотношение составляет~5,5 раза. Это можно сказать также про $\operatorname{tg}\delta$. Так, для того же образца (ЗКЭФ) разница равна $\Delta\operatorname{tg}\delta=1,61$, 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 $\operatorname{tg}\delta$, и низкий показатель этой величины является одним из важных задач. Например, в работе [2,12] показано, что при частоте 15 МГц $\operatorname{tg}\delta=2\cdot10^{-5}$, а при 19 МГц $\operatorname{tg}\delta=10^{-5}$. В другой работе [1] при частоте 10^6Гц $\operatorname{tg}\delta=0,06$. На исследуемых нами образцах, при частоте 10^6Гц получены следующие значения: для образцов ЗКЭФ $\operatorname{tg}\delta=0,0346$, ЗКДБ $\operatorname{tg}\delta=0,08$, 4КЭФ $\operatorname{tg}\delta=0,0361$ и 4КДБ $\operatorname{tg}\delta=0,09$. Эти результаты соответствуют значениям $\operatorname{tg}\delta$ приведенных в работе [1].

В литературе [4, 5] показано, что на величину $\operatorname{tg}\delta$ 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

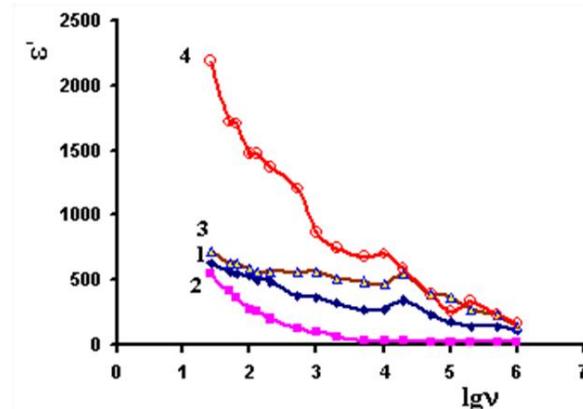


Рис 1. Частотная зависимость действительной части диэлек. проницаемости пленок $\text{Ba}_{0,8}\text{Sr}_{0,2}\text{TiO}_3$
1-ЗКЭФ, 2-ЗКДБ, 3- 4КЭФ, 4-4КДБ

проницаемости ϵ' 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 $\sigma_{ac}(v)$ 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-индукционной диэлектрической дисперсии и описывается выражением

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

Где σ_{dc} – проводимость на постоянном токе, $\omega = 2\pi v$ – 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 правило [13], для многих неупорядоченных материалов, к которым относятся и исследованные нами образцы BaSrTiO_3 , $0 < s < 1$. Наличие линейных участков в зависимости $\ln\sigma_{ac} = f(\ln v)$ согласно [15], говорит о прыжковом механизме переноса заряда. Из рис.3 видно, что для BaSrTiO_3 и всех образцов на обеих участках параметр $s < 1$, что указывает на существование неомического переноса заряда. Для всех образцов выше определенной критической частоты v_c область сравнительно слабой зависимости σ_{ac} (I участок) переходит к более сильной области (II участок). Соответствующие значения v_c и параметра s , вычисленные по наклону линейных участков $\sigma_{ac} (ln v) = f(ln v)$ (рис. 3). Спонтанная

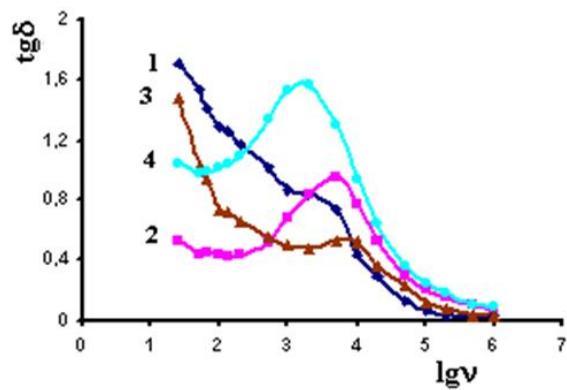


Рис 2. Частотная зависимость тангенса угла диэлектрических потерь пленок $\text{Ba}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{TiO}_3$
1-3КЭФ, 2-3КДБ, 3-4КЭФ, 4-4КДБ

поляризация в сегнетофазе и миграционная поляризация, связанная с прыжковым характером движения носителей заряда по локализованным состояниями [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 BaSrTiO_3 , в том числе образца 3КЭФ наблюдается фазовый переход при температуре 120°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 BaSrTiO_3 , имеется такая электронная проводимость. Таким образом, объяснения фазового перехода в

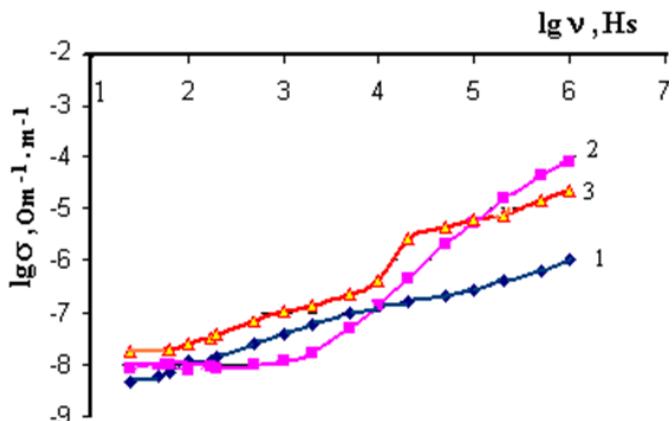


Рис 3. Частотная зависимость электропроводности пленок $\text{Ba}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{TiO}_3$
1-3КЭФ, 2-3КДБ, 3- 4КЭФ, 4-4КДБ

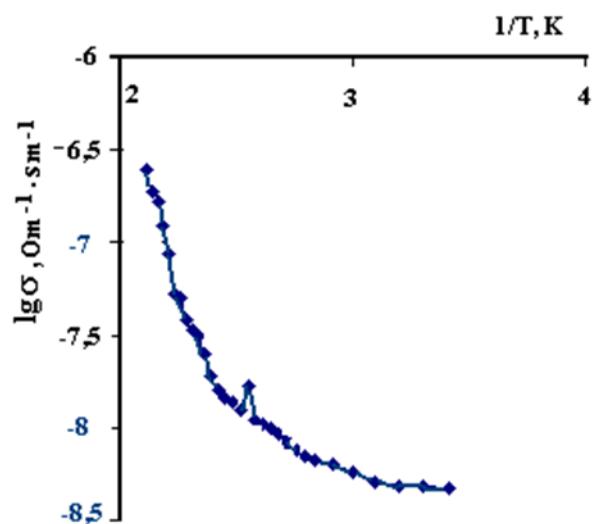


Рис 4. Температурная зависимость электропроводности пленок $\text{Ba}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{TiO}_3$
1-3КЭФ, 2-3КДБ, 3- 4КЭФ, 4-4КДБ

имеется такая электронная проводимость. Таким образом, объяснения фазового перехода в

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 повышенная 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 паразэлектрическую фазу электропроводность скачком уменьшается, а энергия активации увеличивается (рис.4). Следует, отметит, что электропроводность полупроводников и диэлектриков имеет активационную природу: носители заряда генерируются в них термическим, радиационным, оптическим и другими путями. Поэтому наблюдаемые в экспериментескачки 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 $\epsilon'=f(T)$, $\operatorname{tg}\delta=f(T)$ и $\lg\rho=f(T)$ (рис. 5, 6, 7) при нагрев - охлаждение может быть объяснено двояко: 1) либо перестройкой структуры вблизи точкой Кюри (T_k) этих максимумов характерно для сегнетоэлектриков связан с сегнетоэлектрическим фазовым переходом, наблюдаемые максимумы при температуре 150°C и 180°C характерно для сегнетоэлектриков связан спонтанная поляризация. Связи с этим в процессе нагревания

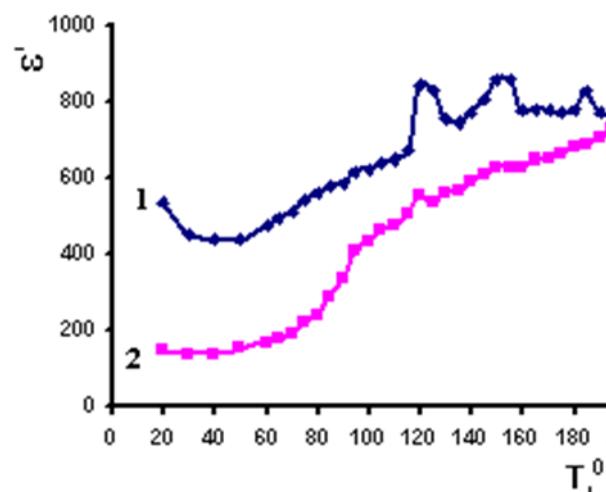


Рис 5. Температурная зависимость ϵ' пленок $Ba_{0.8}Sr_{0.2}TiO_3$

диэлектрическая проницаемость (ϵ) 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 $BaSrTiO_3$ среды дает основание считать, что основным механизмом в нашем случае является эффект «асимметрии» температурной эволюции электрически активных дефектов [14]. Значение электрофизической параметров образцы 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 $tg\delta$ 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 $tg\delta$. Приближенно влияние таких дефектов на свойства кристалла можно

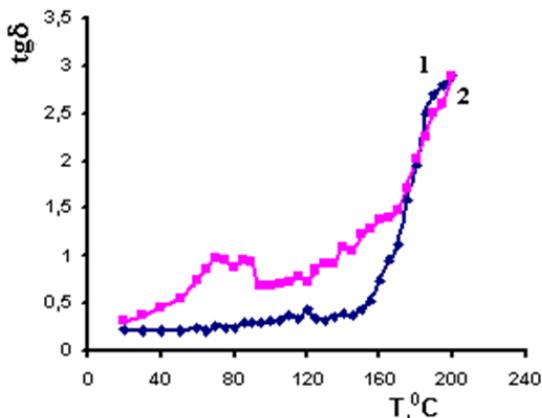


Рис. 6. Температурная зависимость тангенса угла диэлектрических потерь пленок $Ba_{0.8}Sr_{0.2}TiO_3$ 4КДБ (1-нагрев, 2-охлаждение)

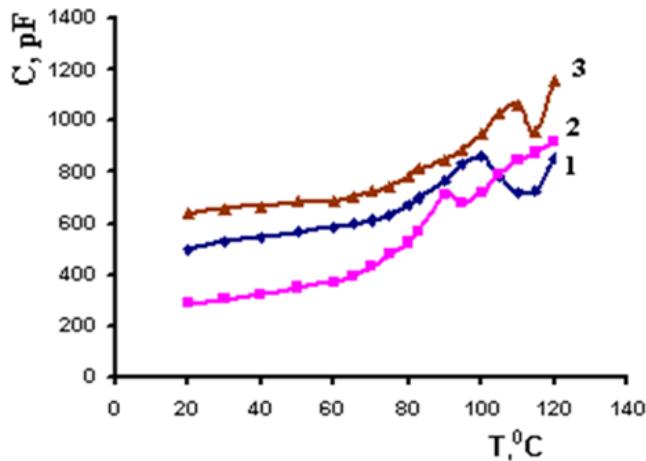


Рис. 7. Температурная зависимость электропроводности образцов: 1-3КЭФ, 2-3КДБ, 3-4КДБ

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

На рис.7 представлена зависимость электрической емкости С образцов (1-ЗКЭФ, 2-ЗКДБ, 3-4КДБ) от температуры для 1кГц частота. Из рисунка видно, что с увеличением температуры дисперсия резко увеличивается, происходит рост С, 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].

ӘДӘВІЙЫАТ

1. *Д.А.Голосов, С.М.Завадский, В.В.Колос, А.С.Туриевич.*
Сегнетоэлектрические свойства пленок легированного ниобием tantalата стронция-висмута.ФТТ,2016,том58,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., Переярцева Л.П., Раевский И.П.* Физика активных диэлектриков. Ростов н /Д: Изд-во ЮФУ, 2009, 480с.
6. *M.Afanasiev, 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. *M.C.Иванов, M.C.Афанасьев.* Особенности формирования тонких сегнетоэлектрических пленок $BaxSr_{1-x}TiO_3$ 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. *A.M.Солодуха, И.Е.Шрамченко, А.М.Ховив, 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 $Ba_0.8Sr0.2TiO_3$. 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 $Ba_0.8Sr0.2TiO_3$. ФТТ, 2016, том 58, вып.10., с.1964-1968.
14. *Соцков В.А., Борисов В.А.* Эволюция атTRACTора макросистемы в зависимости от концентрации приводящей фазы и температуры. ЖТФ, 2007, т.77, в.11, с.103-108.
15. *A.E.Nabiyev, J.I.Huseynov, I.I.Abbasov.* Dielectric properties of $Ba_0.8Sr0.2TiO_3$ 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 зависимость в нанокомпозитах Диэлектрические свойства нанокомпозитов 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 нанокомпозитов Ag/ПАН. ЖТФ, 2014, т.84, в.7, с.67-71.