УДК 537.226 *Оригинальная статья*

# Диэлектрические свойства тонких пленок антисегнетоэлектрика $Pt/0{,}91NaNbO_3\text{-}0{,}09SrZrO_3/SrRuO_3/MgO(001)$

Д.С. Павленко[1], А.Л. Буланова[1], А.В. Павленко[1,2]
*[1]ФГАОУ ВО «Южный федеральный университет»*
*344090, Россия, Ростов-на-Дону, пр-кт Стачки, 194*
*[2]ФГБУН «Федеральный исследовательский центр Южный научный центр РАН»*
*144006, Россия, Ростов-на-Дону, проспект Чехова, 41*
*Antvpr@mail.ru*

DOI: 10.26456/pcascnn/2026.18.112

**Аннотация:** В работе с использованием метода высокочастотного катодного распыления в атмосфере $O_2$ на подложке $SrRuO_3/MgO$(001) были выращены наноразмерные тонкие плёнки $0{,}91NaNbO_3\text{-}0{,}09SrZrO_3$ (*NZNO*-0,09). Комплексными методами рентгеноструктурного анализа и диэлектрической спектроскопии, в совокупности с измерениями петель диэлектрического гистерезиса проведено исследование их кристаллической структуры, диэлектрического отклика и поляризационных характеристик. Установлено, что полученные пленки являются однофазными, беспримесными и при комнатной температуре находятся в антисегнетоэлектрической фазе, при этом в отличии от керамик соответствующего состава по характеру температурно-частотного изменения относительной диэлектрической проницаемости $\varepsilon$ и тангенса угла диэлектрических потерь $tg\ \delta$ являются релаксорами. При анализе дисперсии $\varepsilon$ и $tg\ \delta$ в интервале температур $T = 305\text{-}460$ К и частот $f = 0{,}2\text{-}500$ кГц выявлено наличие вклада в регистрируемый диэлектрический отклик от двух релаксационных процессов, связанных с разными механизмами поляризации. Предложена модель для описания полученных спектров. В работе обсуждаются причины выявленных закономерностей в формировании диэлектрических характеристик, их связь с наноструктурой образца, а также высокая энергоэффективность пленок *NZNO*-0,09. Полученные результаты имеют важность для понимания закономерностей формирования свойств в антисегнетоэлектрических наноразмерных пленках и их применения в современной функциональной электронике.
*Ключевые слова: антисегнетоэлектрик, диэлектрические характеристики, наноразмерные пленки, поляризация, метод высокочастотного катодного распыления.*

*Павленко Данил Сергеевич – магистр 1 курса, НИИ физики ФГАОУ ВО «Южный федеральный университет»*
*Буланова Анна Леонидовна – старший преподаватель, кафедра общей физики, ФГАОУ ВО «Южный федеральный университет»*
*Павленко Анатолий Владимирович – д.ф.-м.н., ведущий научный сотрудник НИИ физики ФГАОУ ВО «Южный федеральный университет», заведующий отделом физики, химии, информатики, ФГБУН «Федеральный исследовательский центр Южный научный центр РАН»*

*Original paper*

# Dielectric properties of $Pt/0{,}91NaNbO_3\text{-}0{,}09SrZrO_3/SrRuO_3/MgO(001)$ antiferroelectric thin films

D.S. Pavlenko[1], A.L. Bulanova[1], A.V. Pavlenko[1,2]
*[1]Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia*
*[2]Southern Scientific Center of the RAS, Rostov-on-Don, Russia*

DOI: 10.26456/pcascnn/2026.18.112

**Abstract:** In this work, $0{,}91NaNbO_3\text{-}0{,}09SrZrO_3$ (*NZNO*-0,09) thin films were grown on *$SrRuO_3/MgO(001)$* substrates using the high-frequency magnetron sputtering method in an $O_2$

© Д.С. Павленко, А.Л. Буланова, А.В. Павленко, 2026

atmosphere. A comprehensive study of their crystal structure, dielectric response, and polarization characteristics was carried out using X-ray diffraction analysis, dielectric spectroscopy, and measurements of dielectric hysteresis loops. It was established that the obtained films are single-phase, impurity-free, and at room temperature they exist in the antiferroelectric phase. At the same time, in contrast to ceramics of the same composition, they exhibit relaxor behavior in terms of the temperature–frequency dependence of the relative permittivity $\varepsilon$ and dielectric loss tangent $tg\ \delta$. Analysis of the dispersion of ε and tan δ in the temperature range $T$ = 305-460 K and frequency range $f$ = 0,2-500 kHz revealed the presence of contributions from two relaxation processes associated with different polarization mechanisms. A model describing the observed spectra is proposed. The paper discusses the origins of the observed features in the formation of dielectric properties, as well as the high energy efficiency of the *NZNO*-0,09 films. The obtained results are important for understanding the mechanisms governing the property formation in antiferroelectric nanoscale thin films in view of their application in modern functional electronics.

*Keywords: antiferroelectric, dielectric properties, thin films, polarization, high-frequency magnetron sputtering method.*

*Danil S. Pavlenko– 1st year graduate student, Research Institute of Physics, Southern Federal University, ORCID: 0009-0008-9069-7302*
*Anna L. Bulanova– Senior Lecturer, Department of General Physics, Southern Federal University*
*Anatoly V. Pavlenko – Dr. Sc., Leading Researcher, Research Institute of Physics, Southern Federal University, Head of the Department of Physics, Chemistry, and Computer Science, Southern Scientific Center of the RAS», ORCID: 0000-0002-4257-2950*

Поступила в редакцию/received: 01.05.2026; после рецензирования/revised: 16.05.2026; принята/accepted: 21.05.2026.

## 1. Введение

В последние годы значительное внимание уделяется разработке диэлектрических наноразмерных материалов для энергонакопительных устройств, работающих при высоких напряжённостях электрического поля [1]. Такие материалы используются в импульсной электронике, силовых конденсаторах, системах быстрого накопления и отдачи энергии, а также в различных устройствах микроэлектроники [2]. В этих применениях важными характеристиками наноматериалов являются плотность запасаемой энергии, диэлектрические потери и обратимость поляризационных процессов. Особый интерес в этом контексте представляют антисегнетоэлектрические (АСЭ) материалы, так как для них характерен индуцируемый электрическим полем фазовый переход в сегнетоэлектрическое состояние, сопровождающийся формированием двойной петли гистерезиса поляризации [3]. Благодаря такому механизму АСЭ способны аккумулировать значительную энергию и эффективно отдавать её при снятии электрического поля, что делает их перспективными материалами для энергонакопительных конденсаторов высокой мощности [4]. Одними из наиболее изученных АСЭ являются соединения на основе $PbZrO_3$ [5], однако физико-химические аспекты использования свинецсодержащих наноматериалов материалов ограничено экологическими требованиями, что стимулирует поиск альтернативных свинецсвободных систем с аналогичными функциональными

характеристиками. В этом отношении особый интерес представляют перовскитные оксиды на основе ниобата натрия, обладающие сложной последовательностью структурных фазовых переходов и способностью формировать АСЭ состояние [6]. Одним из эффективных способов управления свойствами $NaNbO_3$ и наноструктур на его основе является образование твёрдых растворов с изовалентным замещением. В частности, система $(1-x)NaNbO_3 - xSrZrO_3$ в области малых концентраций $x$ характеризуется стабилизацией АСЭ состояния и изменением параметров индуцированного фазового перехода [7]. Дополнительные возможности управления функциональными характеристиками таких материалов возникают при их реализации в виде тонких плёнок. В гетероструктурах эпитаксиальные напряжения, возникающие из-за рассогласования параметров решётки и различий коэффициентов теплового расширения, могут существенно влиять на фазовую стабильность и поляризационный отклик материала по сравнению с объёмными образцами [8]. В связи с этим целью настоящей работы является исследование диэлектрических и поляризационных характеристик эпитаксиальных наноразмерных плёнок состава $0{,}91\ NaNbO_3 - 0{,}09\ SrZrO_3$ ($NZNO-0{,}09$), сформированных в гетероструктуре $Pt/NZNO-0{,}09/SrRuO_3/MgO(001)/$.

## 2. Объекты. Методы получения и исследования

Тонкие пленки $NZNO-0{,}09$ толщиной ~900 нм осаждались на предварительно подготовленную подложку $SrRuO_3$ (300 нм) / $MgO(001)$ методом высокочастотного (ВЧ) катодного распыления в атмосфере кислорода [9] при следующих режимах: начальная температура подложки – 400°С, давление чистого кислорода – 0,55 Торр, ВЧ мощность – 150 Вт, расстояние мишень подложка – 12 мм, время нанесения ~105 мин. Фазовый состав и структурна пленок анализировались рентгенографированием на дифрактометре «ДРОН-4-07» методом $\theta/2\theta$ ($Cu_{K\alpha}$-излучение). Изучение микроструктуры пленки проводилось на сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) Carl Zeiss EVO 40 (Германия).

Для проведения диэлектрических измерений в направлении, перпендикулярном плоскости пленки, на свободную поверхность осаждались $Pt$ электроды. Платина была выбрана благодаря своей химической инертности, исключающей диффузию атомов металла в плёнку, а также высокой работе выхода, которая резко снижает токи утечки и позволяет прикладывать более высокие электрические поля без электрического пробоя. Относительная диэлектрическая проницаемость $\varepsilon$ определялась из соотношения $C = \varepsilon\varepsilon_0 S/h$, где $C$ – емкость структуры, $h$ – толщина слоя сегнетоэлектрика, $\varepsilon_0 = 8{,}854 \cdot 10^{-12}$Ф/м – электрическая

постоянная, $S$ – площадь электрода. Зависимости $\varepsilon(T, f)$ и $tg\delta(T, f)$ получали с помощью измерительного стенда на базе LCR-метра Agilent 4980A и температурной ячейки Linkam. Измерения зависимостей $P(U)$ конденсаторных структур осуществляли на специализированном анализаторе TFAnalyzer2000.

## 3. Экспериментальные результаты и обсуждение

Как видно из рис. 1 на рентгенограммах $\theta - 2\theta$ сканирования гетероструктуры $NZNO - 0,09 / SrRuO_3 / MgO(001)$ в интервале углов $2\theta$ =20-50° присутствовали только рефлексы, вызванные рассеянием излучения слоями $NZNO - 0,09$ (22,53°, 45,90°), $SrRuO_3$ (45,53°) или подложкой $MgO$ (001) (42,96°). Это свидетельствует о том, полученные наноразмерные пленки ниобата-цирконата натрия являются однофазными, беспримесными и выращены гетероэпитаксиально.

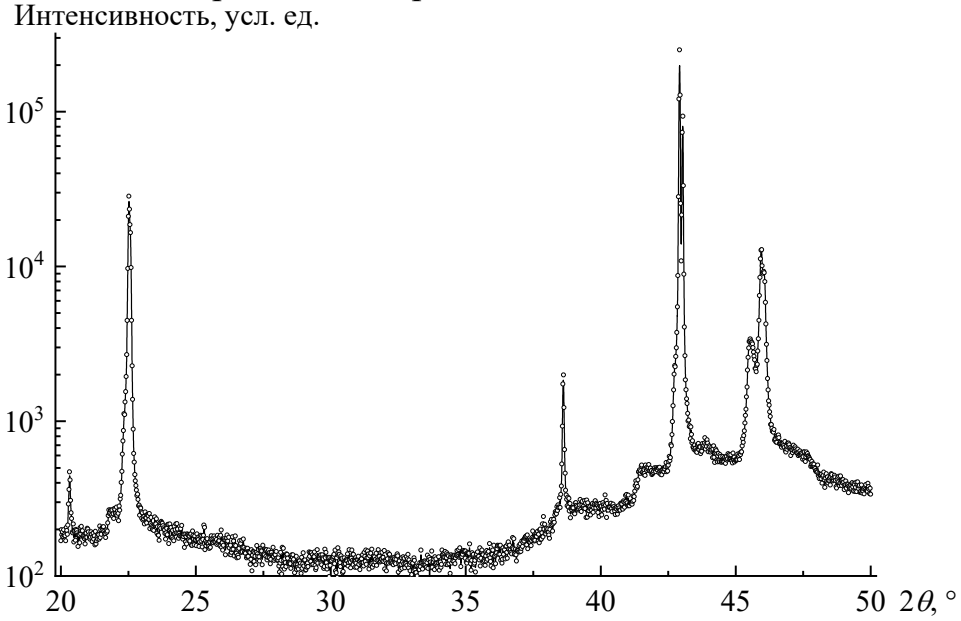



Рис. 1. Рентгенограммы $\theta - 2\theta$ сканирования гетероструктуры $NZNO - 0,09 / SrRuO_3 / MgO(001)$.

Анализ морфологии скола $NZNO - 0,09 / SrRuO_3 / MgO(001)$ методом РЭМ показал, что толщина тестовой пленки $NZNO - 0,09$ составляет ~900 нм, что соответствует скорости роста ~8,5 нм/мин. Между подложкой и пленкой отчетливо был виден слой $SrRuO_3$, который в дальнейшем выступал в качестве нижнего проводящего слоя. Внутренняя структура пленки достаточно однородная, признаков наличия наноразмерных пор, включений примесных и каверн не обнаружено.

Как видно из рис. 2 при комнатной температуре пленка $NZNO - 0,09$ находится в АСЭ фазе: зависимость $P(E)$ имеет форму двойной петли,

которая имеет сужение в окрестности $E = 0$ кВ/см. а величины остаточно поляризации составляют при этом +9,52 мкКл/см$^2$ и -6,13 мкКл/см$^2$.

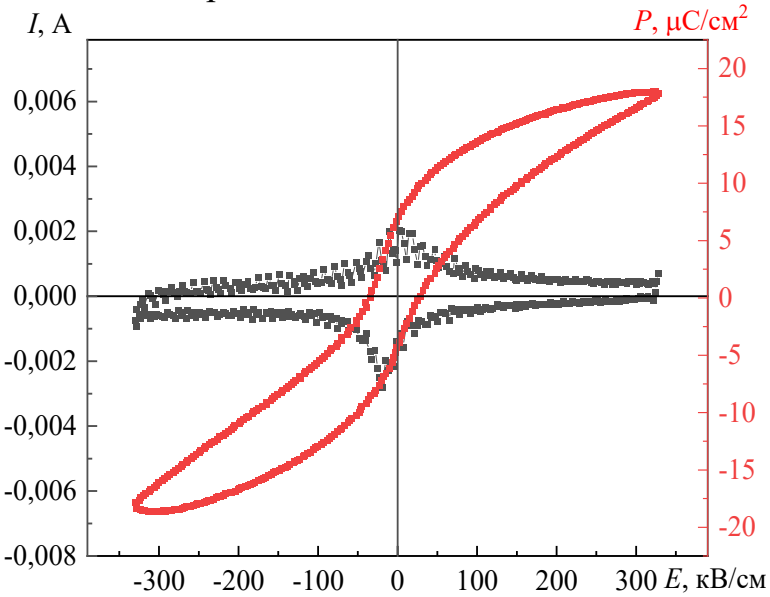
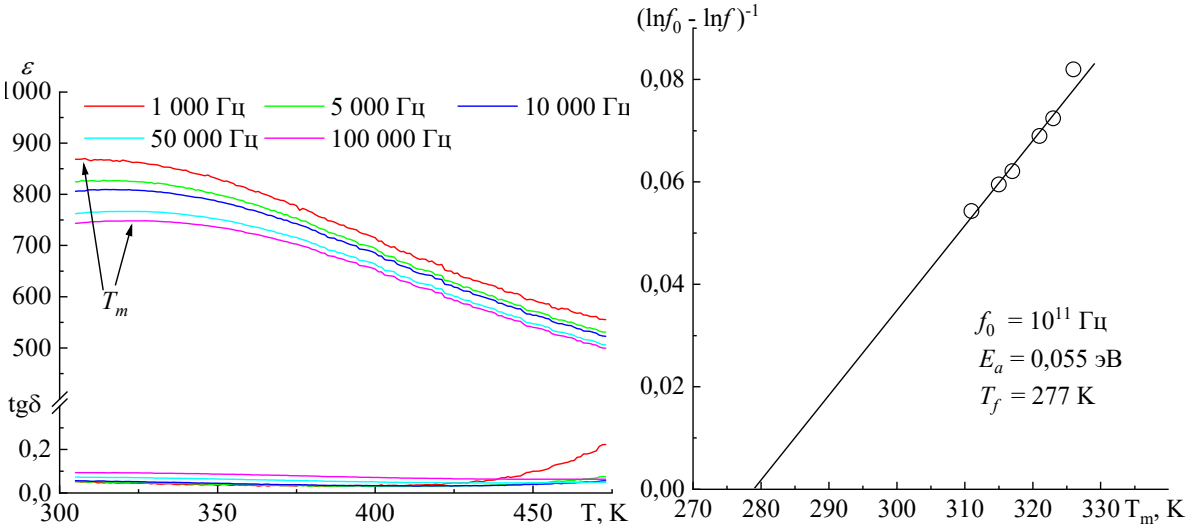



Рис. 2. Зависимость $P(E)$ и $I(E)$ при температуре 293 К на частоте 10 кГц гетероструктуры $Pt / NZNO - 0,09 / SrRuO_3 / MgO(001)$.

Результаты исследования зависимостей $\varepsilon(T, f)$ и $tg\delta(T, f)$ гетероструктуры $Pt / NZNO - 0,09 / SrRuO_3 / MgO(001)$ приведены на рис. 3.




а б

Рис. 3. а – Зависимости $\varepsilon$ и $tg\,\delta$ гетероструктуры $Pt / NZNO - 0,09 / SrRuO_3 / MgO(001)$ от температуры в интервале 300÷480 К в диапазоне часто 0,5-100 кГц; б – зависимость $(\ln f - \ln f_0)^{-1}(T_m)$ (прямая линия – результат расчёта по соотношению Фогеля-Фулчера) гетероструктуры $Pt / NZNO - 0,09 / SrRuO_3 / MgO(001)$.

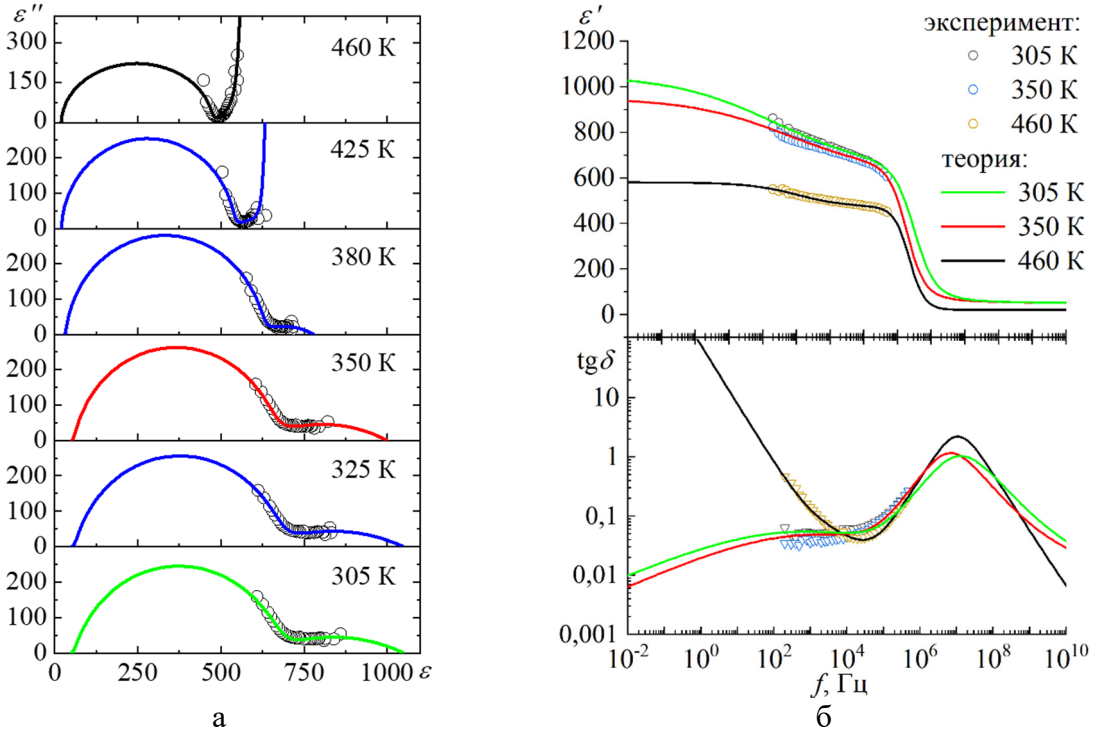
Наличие небольшой асимметрии на кривой P(E) (это видно из разных величин $P_r$ и $E_C$ для положительной и отрицательной ветвей) и появление

«скругления» говорят о том, что в пленке $NZNO-0{,}09$ имеется как небольшое внутренне поле, так и асимметрия в токах утечки, что может быть связанно с разными типами электродов ($SRO$ и $Pt$ соответственно).

В полученной плёнке $NZNO-0{,}09$ при комнатной температуре имеет место дисперсия $\varepsilon$ (снижается с 870 до 750) и $tg\delta$ (возрастает с 0,03 до 0,09), а при увеличении $T$ на зависимостях $\varepsilon(T)$ и $tg\delta(T)$ формируются размытые максимумы при $T_m$, смещающиеся в высокотемпературную область и уменьшающиеся по величине по мере роста $f$. При $T > 430$ K на зависимостях $\varepsilon(T)$ дисперсия начинает нарастать и при низких частотах хорошо видны «горбы», а на $tg\delta(T)$ – рост (до величин ~0,4), вероятнее всего обусловлено ростом провоимости пленок. Анализ зависимости $T_m(f)$ пленки $NZNO-0{,}09$ показал, что она описывается соотношением Фогеля-Фулчера:

$$f = f_0 \cdot \exp\left(\frac{E_{act}}{k \cdot (T_m - T_f)}\right), \qquad (1)$$

где $f_0$ – частота попыток преодоления потенциального барьера $E_{act}$, $k$ – постоянная Больцмана, $T_f$ – температура Фогеля-Фулчера, интерпретируемая как температура «статического замораживания» электрических диполей.




а б

Рис. 4. Экспериментальные (светлые маркеры) и теоретические (линии) зависимости $e''(e')$ (а), $e'(f)$ и $tg\delta(f)$ (б) пленки $NZNO-0{,}09$ при температурах 305-460 K.

Рассчитанные значения $E_{act}$ и $f_0$ составили 0,055 эВ и $10^{11}$ Гц, соответственно, и близки к значениям, наблюдаемым в классических

релаксорах, в которых фазовые переход в параэлектрическую фазу происходит при близких к фиксируемых нами температурах. Рассмотрим более детально эволюцию диаграмм Коула−Коула (зависимости $e''(e')$) и дисперсию $e'(f)$ и $tg\delta(f)$ в $NZNO-0{,}09$, представленных на рис. 4.

При комнатной температуре и вплоть до 380 К на диаграмме Коула-Коула и дисперсионных зависимостях $e''(f)$ *и* $e'(f)$ пленки $NZNO-0{,}09$ в анализируемом диапазоне частот мы наблюдаем признаки наличие вклада от одного релаксационного процесса (т.к. фиксируется часть дуги полуокружности $R_1$), а при $T > 380$ K – от двух разделенных по частоте процессов $R_1$ и $R_2$ (граничная $f$ увеличивается при росте $T$). Для аппроксимация экспериментальных зависимостей $e''(e')$, $e''(f)$ и $e'(f)$ были рассмотрены различные модели, отличающиеся видом функции распределения релаксаторов [10], однако наилучшие результаты были достигнуты при использовании следующего соотношения, в котором вклад от каждого процесса диэлектрической релаксацией описывался симметричной функцией распределения времен релаксаций Коула-Коула:

$$\varepsilon^* = \varepsilon' + i\cdot\varepsilon'' = \varepsilon_{\infty 1} + \frac{\varepsilon_{S1}-\varepsilon_{\infty 1}}{1+(i\cdot f\cdot\tau_1)^{1-\alpha_1}} + \frac{\varepsilon_{S2}-\varepsilon_{S1}}{1+(i\cdot f\cdot\tau_2)^{1-\alpha_2}} + \frac{\gamma_{st}}{2\pi\cdot f\cdot\varepsilon_0}, \qquad (2)$$

где $\alpha_1$ и $\alpha_2$ – коэффициенты, характеризующие распределения времен релаксации (от 0 до 1); $\varepsilon_{S1}$, $\varepsilon_{S2}$ и $\varepsilon_{\infty 1}$ – статические и высокочастотные проницаемости; $\tau_1$ и $\tau_2$ – времена релаксации; $\varepsilon_0$ – диэлектрическая постоянная; $\gamma_{st}$ – сквозная электропроводность. Вклад сингулярного члена необходимо было учитывать только при максимальных температурах. Результаты аппроксимации приведены так же на рис. 4 (сплошные линии). Величины $\alpha_1$ и $\alpha_2$ для выделенных релаксационных процессов сильно разнятся, при этом по мере роста температуры снижаются сопоставимо: для $R_1$ – с 0,14 до 0,01, а для $R_2$ – с 0,73 до 0,50.

Таким образом, выше полученные результаты свидетельствуют о том, что наноразмерные пленки АСЭ $NZNO-0{,}09$ по характеру изменения $\varepsilon(T,f)$ и $tg\delta(T,f)$ можно отнести к релаксорным материалам, при этом в области температур $T < 380$ K основной вклад в диэлектрический отклик даёт вклад релаксационный процесс $R_1$ (связан с полярными флуктуациями в образце и обусловлен переключением наноразмерных полярных областей). При $T > 380$ K все больший вклад начинает давать $R_2$, обусловленный, учитывая величины частот релаксации и рост диэлектрических потерь, поляризацией типа Максвелла–Вагнера [10]. Проявление релаксорных свойств неоднократно отмечалось, например, в таких АСЭ, как $(1-x)Bi_{1/2}Na_{1/2}TiO_3 - xBaTiO_3$ [11] и связывается с динамикой АСЭ доменов с

нерегулярными доменными стенками, что вероятнее всего имеет место и в нашем случае. Косвенно в пользу этого свидетельствует то, что по мере роста температуры в пленке $NZNO-0{,}09$, в отличии от керамики соответствующего состава, фазовый переход сильно размыт, а функция распределения релаксаторов стремится к распределению Дебая (при $\alpha \to 0$ распределение Коула-Коула переходит в распределение Дебая).

В процессе зарядки энергия системы накапливается и выделяется в дальнейшем в виде полезной во время разрядки, при этом часть энергии рассеивается и выделяется в виде тепла в процессе переключения. Для характеризации используются следующие характеристики:

$$W_{st} = \int_{P_R}^{P_{\max}} EdP, \quad W_{re} = -\int_{P_{\max}}^{P_R} EdP, \tag{3}$$

здесь $W_{st}$ – энергия, накопленная во время зарядки, $W_{re}$ – восстановленная полезная энергия, $P_R$ – остаточная поляризация, $P_{\max}$ – максимальная поляризация при пиковом значении эклектического поля, $E$ – приложенное электрическое поле. Гистерезисные потери энергии рассчитываются как $W_{loss} = W_{st} - W_{re}$, а энергоэффективность $(n)$ как $W_{re} / W_{st}$.

Для оценки энергетических характеристик пленки $NZNO-0{,}09$ были измерены зависимости $P(E)$ для положительного полупериода воздействия электрического напряжения проведены расчеты согласно (3) (см. рис. 5).

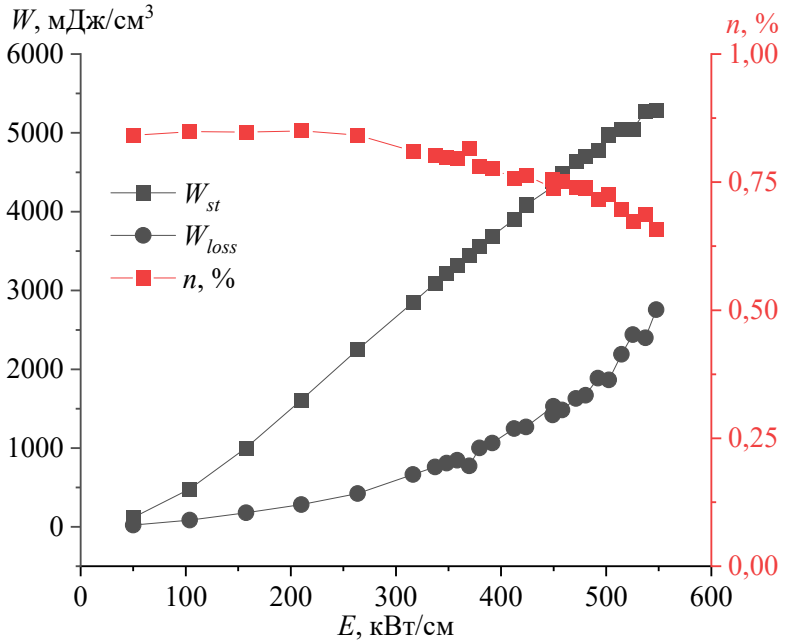



Рис. 5. Зависимость от $E$ величин $W_{st}$, $W_{loss}$ и $n$ для гетероструктуры $Pt / NZNO-0{,}09 / SrRuO_3 / MgO(001)$ при температуре 293 К.

В свинецсодержащих АСЭ наноразмерных плёнках, в частности $PbZrO_3$, при сопоставимых значениях напряжённости электрического поля также могут достигаться близкие значения запасённой энергии, однако, как

правило, с более низкой энергоэффективностью [12]. Видно, что полученные пленки $NZNO-0{,}09$ демонстрируют высокий уровень запасённой энергии при повышенной энергоэффективности.

## 4. Заключение

1. Анализ рентгенограммах $\theta-2\theta$ сканирования и РЭМ изображения поверхности скола гетероструктуры $NZNO-0{,}09/SrRuO_3/MgO(001)$ показали, что полученные наноразмерные пленки $NZNO-0{,}09$ толщиной ~900 нм являются однофазными, беспримесными и выращены гетероэпитаксиально. Вид зависимости $P(E)$ подтвердил, что при комнатной температуре она находится в АСЭ фазе.

2. Выявленные закономерности в изменении $\varepsilon(T,f)$ и $tg\delta(T,f)$ конденсаторной структуры $Pt/NZNO-0{,}09/SrRuO_3/MgO(001)$ показали, что наноразмерные пленки АСЭ $NZNO-0{,}09$ относятся к релаксорным материалам, при этом в области температур $T<380$ K основной вклад в диэлектрический отклик даёт вклад релаксационный процесс $R_1$ (связан с полярными флуктуациями в образце и обусловлены, переключением полярных наноразмерных областей), а при $T>380$ K все больший вклад начинает давать $R_2$, обусловленный поляризацией типа Максвелла-Вагнера. Для описания вклада в диэлектрический отклик от каждого процесса достаточным является рассмотрение модели диэлектрической среды функцией распределения времен релаксаций вида Коула-Коула.

3. Показано, что пленки $NZNO-0{,}09$ толщиной ~900 нм демонстрируют высокий уровень запасённой энергии (~5500 мДж/см$^3$ при 550 кВ/см), что делает их перспективными для применения в бессвинцовых диэлектрических накопителях энергии.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (Государственное задание в сфере научной деятельности, проект № FENW-2026-0022) с использованием приборной базы ЦКП ЮНЦ РАН № 501994 (https://ckp-rf.ru/catalog/ckp/501994/).*

**Библиографический список:**

1. **Lui, Z.** Antiferroelectrics for energy storage applications: a review / Z. Lui, T. Lu, J. Ye et al. // Advanced Materials Technologies. – 2018. – V. 3. – I. 9. – Art. №. 1800111. – 21 p. DOI: 10.1002/admt.201800111.

2. **Setter, N.** Ferroelectric thin films: review of materials, properties, and applications / N. Setter, D. Damjanovic, L. Eng et al. // Journal of Applied Physics. – 2006. – V. 100. – I. 5. – P. 051606-1-051606-46. DOI: 10.1063/1.2336999.

3. **Смирнова, Е.П.** Эволюция фазовых переходов и эффект сохранения энергии в твёрдых растворах $SrTiO_3$–$PbZrO_3$ / Е.П. Смирнова, Р.С. Пассет, Г.Ю. Сотникова и др. // Физика твердого тела. – 2023. – Т. 65. – Вып. 5. – С. 862-866. DOI: 10.21883/FTT.2023.05.55506.30.

4. **Вахрушев, С.Б.** Антиферродисторсионная мягкая мода в кристалле $PbZr_{0.024}Ti_{0.976}O_3$ / С.Б. Вахрушев, Ю.А. Бронвальд, К.А. Петрухно и др. // Физика твердого тела. – 2021. – Т. 63. – Вып. 10. – Р. 1553-1559. DOI: 10.21883/FTT.2021.10.51405.113.

5. **Ueda, R.** X-ray study on phase transition of lead zirconate, $PbZrO_3$ / R. Ueda, G. Shirane // Journal of the

Physical Society of Japan. – 1951. – V. 6. – I. 3. – P. 209-210. DOI: 10.1143/jpsj.6.209.
6. **Htet, C.S.** Atomic structural mechanism for ferroelectric-antiferroelectric transformation in perovskite $NaNbO_3$ / C.S. Htet, S. Nayak, A. Manjón-Sanz et al. // Physical Review B. – 2022. – V. 105. – I. 17. – P. 174113-1-174113-13. DOI: 10.1103/PhysRevB.105.174113.
7. **Guo, H.** Strategy for stabilization of the antiferroelectric phase (*Pbma*) over the metastable ferroelectric phase ($P2_1ma$) to establish double loop hysteresis in lead-free $(1-x)NaNbO_3–xSrZrO_3$ solid solution / H. Guo, H. Shimizu, Y. Mizuno, C.A. Randall // Journal of Applied Physics. – 2015. – V. 117. – I. 21. – P. 214103-1-214103-6. DOI: 10.1063/1.4921876.
8. **Юзюк, Ю.И.** Влияние механизма роста и термоупругих напряжений на динамику кристаллической решетки гетероэпитаксиальных пленок титаната бария–стронция / Ю.И. Юзюк, И.Н. Захарченко, В.А. Алёшин и др. // Физика твердого тела. – 2007. – Т. 49. – Вып. 9 – С. 1676-1682.
9. **Павленко, А.В.** Наноразмерные пленки ниобата бария-стронция: особенности получения в плазме высокочастотного разряда, структура и физические свойства / А.В. Павленко, С.П. Зинченко, Д.В. Стрюков, А.П. Ковтун. – Ростов-на-Дону: ЮНЦ РАН, 2022. – 242 с.
10. **Богатин, А.С.** Процессы релаксационной поляризации в диэлектриках с большой сквозной электропроводностью / А.С. Богатин, А.В. Турик. – Ростов-на-Дону: Изд-во «Феникс», 2013. – 256 с.
11. **Ma, C.** Phase diagram of unpoled lead-free $(1-x)(Bi_{1/2}Na_{1/2})\ TiO_3–xBaTiO_3$ ceramics / C. Ma, X. Tan // Solid State Communications – 2010. – V. 150. – I. 33-34. – P. 1497-1500. DOI: 10.1016/j.ssc.2010.06.006
12. **Nguyen, M.D.** Effect of substrate and electrode on the crystalline structure and energy storage performance of antiferroelectric $PbZrO_3$ films / M.D. Nguyen // Thin Solid Films. – 2021. – V. 717. – Art. № 138441. – 33 p. DOI: 10.1016/j.tsf.2020.138441.

**References:**

1. Lui Z., Lu Z., Ye J. et al Antiferroelectrics for energy storage applications: a review, *Advanced Materials Technologies*, 2018, vol. 3, issue 9, art. no. 1800111, 21 p. DOI: 10.1002/admt.201800111.
2. Setter N., Damjanovic D., Eng L. et al. Ferroelectric thin films: review of materials, properties, and applications, *Journal of Applied Physics*, 2006, vol. 100, issue 5, pp. 051606-1-051606-46. DOI: 10.1063/1.2336999.
3. Smirnova E.P., Passet R.S., Sotnikova G.Yu. et al. Evolution of phase transitions and the energy conservation effect in $SrTiO_3–PbZrO_3$ solid solutions, Solid State Physics, 2023, vol. 65, no. 5, pp. 828-832. DOI: 10.21883/PSS.2023.05.56057.30.
4. Vakhrushev S.B., Bronvald Yu.A., Petroukhno K.A. et al. Antiferrodistortive soft mode in $PbZr_{0.024}Ti_{0.976}O_3$ crystal, *Physics of the Solid State*, 2021, vol. 63, issue 12, pp. 1840-1846. DOI: 10.1134/S1063783421100383.
5. Ueda R., Shirane G. X-ray study on phase transition of lead zirconate, $PbZrO_3$, Journal of the Physical Society of Japan, 1951, vol. 6, issue 3, pp. 209-210. DOI: 10.1143/jpsj.6.209.
6. Htet C.S., Nayak S., Manjón-Sanz A. et al. Atomic structural mechanism for ferroelectric-antiferroelectric transformation in perovskite $NaNbO_3$, Physical Review B, 2022, vol. 105, issue 17, pp. 174113-1-174113-13. DOI: 10.1103/PhysRevB.105.174113.
7. Guo H., Shimizu H., Mizuno Y., Randall C.A. Strategy for stabilization of the antiferroelectric phase (*Pbma*) over the metastable ferroelectric phase ($P2_1ma$) to establish double loop hysteresis in lead-free $(1-x)NaNbO_3–xSrZrO_3$ solid solution, *Journal of Applied Physics*, 2015, vol. 117, issue 21, pp. 214103-1-214103-6. DOI: 10.1063/1.4921876.
8. Yuzyuk Yu.I., Zakharchenko I.N., Alyoshin V.A. et al. Influence of the growth mechanism and thermoelastic stresses on the lattice dynamics of heteroepitaxial films of barium strontium titanate, *Physics of the Solid State*, 2007, vol. 49, issue 9, pp. 1759-1765. DOI: 10.1134/S1063783407090247.
9. Pavlenko A.V., Zinchenko S.P., Stryukov D.V., Kovtun A.P. *Nanorazmernye plenki niobata bariya-strontsiya: osobennosti polucheniya v plazme vysokochastotnogo razryada, struktura i fizicheskie svojstva* [Nanosized films of barium-strontium niobate: features of production in plasma of high-frequency discharge, structure and physical properties]. Rostov-on-Don, The Southern Scientific Centre of the RAS Publ., 2022, 242 p. (In Russian).
10. Bogatin A.S., Turik A.V. *Protsessy relaksatsionnoj polyarizatsii v dielektrikakh s bol'shoj skvoznoj elektroprovodnost'yu* [Processes of relaxation polarization in dielectrics with large through-current conductivity]. Rostov-on-Don, Publishing House «Feniks», 2013, 256 p. (In Russian).
11. Ma C., Tan X. Phase diagram of unpoled lead-free $(1-x)(Bi_{1/2}Na_{1/2})\ TiO_3–xBaTiO_3$ ceramics, *Solid State Communications*, 2010, vol. 150, issues 33-34, pp. 1497-1500. DOI: 10.1016/j.ssc.2010.06.006.
12. Nguyen M.D. Effect of substrate and electrode on the crystalline structure and energy storage performance of antiferroelectric $PbZrO_3$ films, *Thin Solid Films*, 2021, vol. 717, art. no. 138441, 33 p. DOI: 10.1016/j.tsf.2020.138441.