

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ
ПАРАМЕТРОВ НА ВОСПРОИЗВОДИМОСТЬ
СВОЙСТВ АКТИВНЫХ ДИЭЛЕКТРИКОВ**

*Е. А. Печерская, А. Н. Головяшкин, А. А. Головяшкин,
Т. О. Зинченко, А. В. Печерский, А. В. Фимин*

**RESEARCH OF THE INFLUENCE OF TECHNOLOGICAL
PARAMETERS ON REPRODUCIBILITY
OF THE PROPERTIES OF ACTIVE DIELECTRICS**

*E. A. Pecherskaya, A. N. Golovyashkin, A. A. Golovyashkin,
T. O. Zinchenko, A. V. Pecherskiy, A. V. Fimin*

Аннотация. *Актуальность и цели.* Современный этап развития нано- и микроэлектроники связан с использованием активных диэлектриков, которые находят широкое применение в высокочувствительной датчиковой аппаратуре. Актуальной проблемой является повышение воспроизводимости свойств активных диэлектриков, исследование влияния на нее технологических параметров, чему посвящена данная статья. *Материалы и методы.* В работе исследованы активные диэлектрики, обладающие сегнетоэлектрическими и пьезоэлектрическими свойствами. Приведены результаты экспериментального исследования влияния рентгеновского излучения на зависимость относительной диэлектрической проницаемости от напряженности электрического поля образцов триглицинсульфата. *Результаты.* Представлено аналитическое описание влияния технологических параметров и различного рода внешних факторов (тепловых, электрических, магнитных, механических) на свойства активных диэлектриков (относительную диэлектрическую проницаемость, поляризованность), которые определяют использование материалов в элементах функциональной электроники. Доказана целесообразность использования рентгеновского излучения для повышения воспроизводимости диэлектрических параметров водородосодержащих сегнетоэлектриков. *Выводы.* Повышение воспроизводимости параметров обусловлено наличием пологих участков в зависимости относительной диэлектрической проницаемости от напряженности электрического поля $\epsilon(E)$ при воздействии рентгеновского излучения, в связи с чем существенно снижаются дополнительные погрешности измерения диэлектрических свойств, обусловленные невозможностью фиксации точных значений технологических параметров.

Ключевые слова: триглицинсульфат, воспроизводимость параметров, дополнительная погрешность, рентгеновское излучение.

Abstract. *Background.* The current stage of development of nano- and microelectronics is connected with the use of active dielectrics, which find wide application in highly sensitive sensor equipment. The actual problem is an increase in the reproducibility of the properties of active dielectrics, the study of the influence of technological parameters on the reproducibility, which is the subject of this article. *Materials and methods.* In the work, active dielectrics with ferroelectric and piezoelectric properties are investigated. The results of an experimental study of the effect of X-ray radiation on the dependence of the relative

permittivity on the electric field strength of triglycine sulfate samples are presented. *Results.* The analytical description of the influence of technological parameters and various external factors (thermal, electric, magnetic, mechanical) on the properties of active dielectrics (relative permittivity, polarity) that define the use of materials in functional electronics elements is presented. The expediency of using X-ray radiation to increase the reproducibility of the dielectric parameters of hydrogen-containing ferroelectrics. *Conclusions.* The increase in the reproducibility of the parameters is due to the presence of gently sloping sections in the dependence of the relative permittivity on the electric field strength $\epsilon(E)$ under the influence of X-ray radiation, and therefore the additional errors in the measurement of dielectric properties are substantially reduced due to the impossibility of fixing the exact values of the process parameters.

Key words: triglycine sulfate, reproducibility of parameters, additional error, X-ray radiation.

Введение

Современный уровень развития приборостроения и возникших на его базе микро- и нанотехнологий в значительной степени определяется широким применением активных диэлектриков. Создание высокочувствительной датчиковой аппаратуры для прецизионного измерения физических величин основано в том числе на применении сегнетоэлектрических твердых растворов цирконата-титаната свинца (ЦТС), которые выпускаются промышленностью в виде керамики [1, 2]. С одной стороны, изделия из керамики не обладают анизотропией свойств, что упрощает описание их характеристик и применение. С другой стороны, большая зависимость свойств керамики ЦТС от фазового состава, зернистости кристаллитов и их структурного совершенства, что определяется технологическими параметрами на всех стадиях изготовления, приводит к необходимости поиска новых методов получения и обработки таких материалов с целью повышения технологической воспроизводимости их основных характеристик. Технология производства керамики ЦТС определяет также скорость деградиационных процессов в материале. Последнее сказывается на длительности эксплуатации изделий на основе активных диэлектриков.

Экстремальные значения пьезочувствительности, пьезомодуля и диэлектрических параметров приходятся на область морфотропного перехода (ОМП) ромбоэдрической и тетрагональной фаз. Однако керамика ЦТС такого состава обладает повышенной чувствительностью к изменению технологических режимов, в том числе связанных с погрешностью измерений и контроля параметров технологического процесса. Ниже рассмотрено влияние технологических параметров на пьезоэлектрические, сегнетоэлектрические и пироэлектрические свойства активных диэлектриков.

Аналитическое описание влияния технологических параметров на свойства активных диэлектриков

Свойства активных диэлектриков и параметры, влияющие на них, перечислены в табл. 1. Указанные параметры либо фиксируются, либо изменяются в заданных пределах в процессе синтеза материалов.

Таблица 1

Взаимосвязь между технологическими параметрами
и свойствами активных диэлектриков

Свойства активных диэлектриков, обозначение	Аналитическое описание взаимосвязи технологических параметров и свойств материалов
1	2
1. Диэлектрическая восприимчивость, η	$\eta = \frac{\partial P}{\partial E}$, где P – спонтанная поляризованность; E – напряженность электрического поля
2. Константа пьезоэлектрического напряжения, $-a$	$-a = \frac{\partial E}{\partial l}$, где l – механическая деформация
3. Постоянная пьезоэлектрического эффекта, d'	$d' = \frac{\partial l}{\partial E}$
4. Коэффициент упругости, k	$k = \frac{\partial l}{\partial L} = \frac{d}{e}$, где L – механическое напряжение
5. Коэффициент пьезоэлектрического напряжения, e	$e = \frac{\partial P}{\partial l}$
6. Коэффициент обратного пьезоэлектрического напряжения, b'	$b' = \frac{\partial l}{\partial P}$
7. Коэффициент теплового расширения, α	$\alpha = \frac{\partial l}{\partial T}$, где T – термодинамическая температура
8. Пироэлектрический коэффициент, ρ	$\rho = \frac{\partial P}{\partial T}$
9. Коэффициент пьезоэлектрической деформации, d	$d = \frac{\partial P}{\partial L}$
10. Коэффициент обратной пьезоэлектрической деформации, $-a'$	$-a' = \frac{\partial L}{\partial P}$
11. Электромагнитная восприимчивость, $\eta^{\text{ЭМ}}$	$\eta^{\text{ЭМ}} = \frac{\partial P}{\partial H}$, где H – напряженность магнитного поля
12. Магнитоэлектрическая восприимчивость, $\eta^{\text{МЭ}}$	$\eta^{\text{МЭ}} = \frac{\partial M}{\partial E}$, M – намагниченность
13. Магнитная восприимчивость, $\eta^{\text{М}}$	$\eta^{\text{М}} = \frac{\partial M}{\partial H}$
14. Коэффициент, описывающий влияние давления y на температуру Кюри T_C , $n_{T_C, y}$	$n_{T_C, y} = \frac{\partial T_C}{\partial y}$
15. Коэффициент, описывающий влияние γ -облучения дозой D на T_C , $n_{T_C, D}$	$n_{T_C, D} = \frac{\partial T_C}{\partial D}$

1	2
16. Коэффициент, описывающий влияние γ -облучения дозой D на P , $n_{P,D}$	$n_{P,D} = \frac{\partial P}{\partial D}$
17. Коэффициент, описывающий влияние химического состава (например, процентное содержание Ba) x на T_C , $n_{T_C,x}$	$n_{T_C,x} = \frac{\partial T_C}{\partial x}$
18. Коэффициент, описывающий влияние меры дефектности образца ξ на P , $n_{P,\xi}$	$n_{P,\xi} = \frac{\partial P}{\partial \xi}$
19. Коэффициент, описывающий влияние частоты f на P , $n_{P,f}$	$n_{P,f} = \frac{\partial P}{\partial f}$
20. Коэффициент, описывающий влияние x на P , $n_{P,x}$	$n_{P,x} = \frac{\partial P}{\partial x}$

В общем виде аналитическое описание влияния технологических параметров на свойства активных диэлектриков целесообразно представить в виде следующей модели:

$$\begin{cases} \partial M = \eta^M \partial E + \eta^M \partial H, \\ \partial E = -a \partial l, \\ \partial l = \alpha \partial T + d' \partial E + k \partial L + b' \partial P, \\ \partial P = \rho \partial T + \eta \partial E + n_{P,\xi} \partial \xi + n_{P,x} \partial x + d \partial L + \eta^M \partial M + n_{P,D} \partial D + n_{P,f} \partial f + e \partial l, \\ \partial T_C = n_{T_C,x} \partial x + n_{T_C,D} \partial D + n_{T_C,y} \partial y, \\ \partial L = -a' \partial P. \end{cases} \quad (1)$$

Модель (1) при существенном влиянии температуры, механического напряжения, напряженности электрического поля преобразуется в модель взаимосвязи параметров сегнетоэлектрика, рассмотренную в работах [3–5].

При отклонении технологических параметров от номинальных значений согласно системе уравнений (1) имеет место изменение свойств материала, которое влияет на воспроизводимость его свойств. Рассмотрим пример определения дополнительной погрешности измерения диэлектрической восприимчивости активных диэлектриков, обусловленной отклонением влияющих факторов от номинальных значений в технологическом процессе.

Результат измерения диэлектрической восприимчивости $\tilde{\eta}$ включает в себя абсолютную дополнительную погрешность $\Delta_{\Delta\eta}$:

$$\tilde{\eta} = \eta + \Delta_{\Delta\eta} = \frac{\partial P + \Delta_{\Delta P \eta}}{\partial E}, \quad (2)$$

где $\Delta_{\Delta P \eta}$ – абсолютная погрешность измерения реакции (поляризованности) при информативном параметре – воздействии в виде напряженности электрического поля.

В формуле (2) перед $\Delta_{\Delta P \eta}$ стоит знак «+», так как $\Delta_{\Delta P \eta}$ – предельное значение абсолютной погрешности, действительное значение которой $\varepsilon_{\Delta P \eta} \in [-\Delta_{\Delta P \eta}, +\Delta_{\Delta P \eta}]$.

Из формулы (1) выразим $\Delta_{\Delta P \eta}$:

$$\partial P = \eta \cdot \partial E + \Delta_{\Delta P \eta},$$

$$\Delta_{\Delta P \eta} = \rho \partial T + n_{P,\xi} \partial \xi + n_{P,x} \partial x + d \partial L + \eta^{\text{эм}} \partial M + n_{P,D} \partial D + n_{P,f} \partial f + e \partial l.$$

Предельная дополнительная абсолютная погрешность измерения диэлектрической восприимчивости $\Delta_{\Delta \eta}$ связана с $\Delta_{\Delta P \eta}$:

$$\Delta_{\Delta \eta} = \frac{\partial P + \Delta_{\Delta P \eta}}{\partial E} - \frac{\partial P}{\partial E} = \frac{\Delta_{\Delta P \eta}}{\partial E}. \quad (3)$$

В относительном виде предельная дополнительная погрешность измерения диэлектрической восприимчивости $\delta_{\Delta \eta}$ определяется следующим образом:

$$\delta_{\Delta \eta} = \frac{\Delta_{\Delta \eta}}{\eta} = \frac{\Delta_{\Delta P \eta}}{\partial P}. \quad (4)$$

Анализ выражения (4) позволяет заключить, что $\delta_{\Delta \eta} = \delta_{\Delta P \eta}$. Это указывает на то, что относительное отклонение поляризации материала от требуемого значения в технологическом процессе приводит численно к такому же относительному отклонению от требуемого значения диэлектрической восприимчивости.

Аналогичным образом авторами получены выражения для оценивания погрешностей других свойств активных диэлектриков, обусловленных именно изменением технологических режимов. Таким образом, низкая технологическая воспроизводимость свойств (дополнительная погрешность от влияющих факторов может достигать десятки процентов) накладывает ограничения на использование материалов в элементах функциональной электроники.

Применение рентгеновского облучения для повышения воспроизводимости параметров активных диэлектриков

Для решения задач, связанных с повышением воспроизводимости свойств и пьезоэлектрических характеристик, в качестве дополнительной обработки материала предлагается использовать рентгеновское излучение. Облучение рентгеновскими лучами имеет преимущество перед традиционным термическим отжигом. Скорость и эффективность отжига дефектов зависят от разности значений реальной и равновесной их концентраций. С ростом

температуры абсолютное значение равновесной концентрации повышается. Рентгеновское облучение можно проводить при комнатных температурах. Облучение более жестким электромагнитным излучением вызывает образование вторичных радиационных дефектов. По сравнению с электронным облучением рентгеновское позволяет провести равномерную обработку материала по всей его толщине. Проведенные авторами эксперименты и исследования показали, что миграция точечных дефектов под действием рентгеновского излучения в электрическом поле спонтанной поляризации приводит к их радиационному отжигу и закреплению поляризованного состояния. Этот процесс можно использовать как для повышения, так и для усреднения основных электрофизических характеристик керамики ЦТС, а также для изменения времени старения материала. Альтернативным способом повышения пьезочувствительности является метод перфорации. Суть метода – создание на одной рабочей поверхности пьезоэлемента сетчатого рифления. Недостатком этого метода является необходимость сложных технологических операций на этапе изготовления и контроля микрорельефа сложной формы, а также снижение механической прочности материала при перфорации.

Взаимодействие рентгеновского излучения с моно- поликристаллическими и керамическими сегнетоэлектриками достаточно полно описывается процессами, связанными с фотоэффектом и вторичным облучением комптоновскими электронами. Их проявления зависят от характера химических связей в веществе. Так, у водородосодержащих сегнетоэлектриков (ТГС, ДТГС) облучение понижает диэлектрическую проницаемость ϵ и тангенс угла диэлектрических потерь $\tan\delta$. Причем подавление высоких значений диэлектрической проницаемости в точке Кюри $\epsilon_{\max}$ и $\tan\delta$ имеет одну и ту же феноменологическую причину – выключение доменного вклада за счет блокирования доменных границ дефектами в электрических полях, меньших значения коэрцитивного поля [6]. Влияние радиации на ТГС, ДТГС, KDP, ГАС и другие кристаллы проявляется, кроме того, в искажении петель гистерезиса благодаря закреплению доменных стенок на дефектах и возникновению внутреннего электрического поля смещения.

В облученных сегнетоэлектриках кислородно-октаэдрического типа со структурой перовскита и общей формулой ABO_3 наиболее ощутимые изменения происходят на уровне электронной структуры кристалла, которые носят динамический характер, а ионизирующая радиация играет роль активирующего фактора процессов миграции дефектов. Экспериментальные данные по поведению электропроводности облученных кристаллов ABO_3 у разных авторов достаточно противоречивы: от вывода о несущественных изменениях до повышения удельного объемного сопротивления на несколько порядков. Наиболее разнообразно влияние рентгеновского излучения на электропроводность многокомпонентных твердых растворов ЦТС, где велика роль предыстории образцов, изменения зерновой структуры при спекании в параэлектрической фазе. В отличие от водородосодержащих сегнетоэлектриков у керамики ЦТСЛ-1/65/35 при малых дозах (до 10^6 Р) наблюдается обратное явление – рост $\epsilon_{\max}$, что в работе [7] связано с радиационным отжигом

естественных дефектов. У этой керамики после облучения сохранилась, как и у ТГС, устойчивая тенденция к снижению $\text{tg}\delta$. Структурно-чувствительными параметрами при этом являются симметрия кристаллических фаз, параметры элементарных ячеек, текстура и внутрикристаллитные микродеформации. Изменения структурно-чувствительных параметров сказываются на всех электрофизических свойствах сегнетокерамики.

Анализируя технологическую воспроизводимость свойств сегнетокерамики ЦТС, следует обратить внимание на неравномерность распределения примесей, которые влияют на протяженность ОМП. В связи с этим актуален вопрос о временной и температурной стабильностях параметров. Изготовители сегнетокерамики вынуждены использовать составы ЦТС ромбоэдрической и тетрагональной фаз для поддержания стабильности свойств, поступаясь их экстремальными значениями, характерными для составов из ОМП.

Теоретическое обоснование режимов рентгеновского облучения для управления электрофизическими параметрами керамики ЦТС с фазовым составом вблизи ОМП требует детального изучения поведения точечных дефектов в этих материалах.

Возможность контролируемого изменения электрофизических параметров активных диэлектриков без существенных изменений в технологии их производства позволяет сравнительно просто улучшать эксплуатационные характеристики приборов, изготавливаемых на их основе. Полученные модельные представления о процессах, происходящих в сегнетоэлектриках при рентгеновском облучении, сокращают время для поиска оптимальных режимов обработки материалов.

На основе анализа закономерностей преобразования первичного рентгеновского излучения во внутреннее электронное облучение получены выражения для расчета процессов взаимодействия рентгеновского излучения с точечными дефектами кристалла [8]. Для исключения образования вторичных радиационных дефектов и начала процессов упругих смещений точечных дефектов необходимо, чтобы энергия комптоновских электронов находилась в интервале от 5 до 100 кэВ. В кристаллах со структурой перовскита (например, в ЦТС-керамике) в слабых полях при комнатной температуре увеличение дозы рентгеновского излучения приводит к понижению относительной диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь [9]. Однако при малых дозах облучение может приводить к росту относительной диэлектрической проницаемости, в то же время тангенс угла диэлектрических потерь снижается. Основные изменения происходят на уровне электронной структуры кристалла, носят динамический характер, где ионизирующая радиация играет роль активирующего фактора для процессов миграции дефектов и примесей. При рентгеновском облучении кристаллов ТГС в зависимости относительной диэлектрической проницаемости от амплитудного значения напряженности электрического поля $\epsilon(E)$ появляется пологий участок (рис. 1), который выражен тем сильнее, чем выше суммарная доза облучения. Выводы хорошо согласуются с результатами эксперимента, описанными в [10].

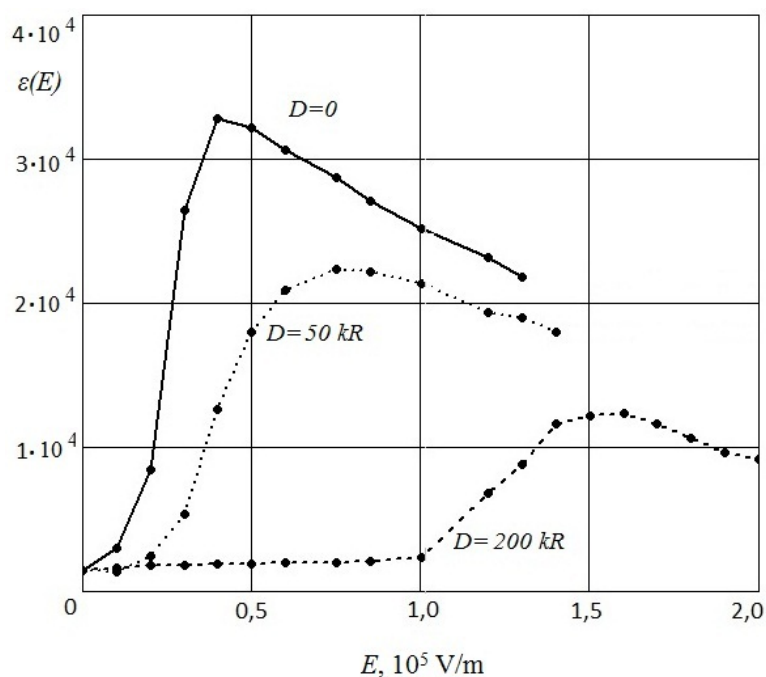


Рис. 1. Зависимости $\varepsilon(E)$ для номинально чистого ТГС при разных дозах облучения. Измерения получены при температуре $T = 20^\circ\text{C}$, частоте электрического поля $f = 50$ Гц

В зависимостях $\varepsilon(E)$ имеют место амплитудно-независимые участки, что обусловлено отсутствием процесса переполаризации в части объема образца, закреплением части доменных стенок радиационными дефектами. Благодаря возникновению подобных амплитудно-независимых участков возможно существенное снижение дополнительных погрешностей измерения диэлектрических параметров сегнетоэлектриков, обусловленных отклонением влияющих факторов (в данном случае амплитуды напряженности электрического поля) от номинальных значений. Результаты экспериментального определения зависимости $\varepsilon(E)$ подтверждают снижение дополнительной погрешности измерения относительной диэлектрической проницаемости образца, облученного дозой радиации D по сравнению с необлученным образцом. Например, в окрестностях амплитудного значения $E = 0,3$ кВ/см дополнительная погрешность измерения относительной диэлектрической проницаемости уменьшается не менее, чем в 2,5 раза при облучении дозой $D = 50$ КиР, в то же время при облучении дозой радиации $D = 200$ КиР имеет место снижение дополнительной погрешности не менее, чем в 200 раз. Это подчеркивает целесообразность использования рентгеновского облучения для повышения воспроизводимости параметров сегнетоэлектриков.

Рассмотрим закономерности преобразования первичного рентгеновского излучения во внутреннее электронное излучение, что позволит получить выражения для расчета числа смещений дефекта в единицу времени. Это, в свою очередь, характеризует эффективность радиационного отжига и миграции точечных дефектов в кристаллах [8].

Скорость изменения отжигаемых или закрепляющихся дефектов на доменных границах зависит от концентрации N . Для времени облучения t может быть записано линейное дифференциальное уравнение

$$\frac{dN}{dt} = zN(t). \quad (5)$$

Общее решение (5) при максимальной концентрации отжигаемых дефектов $N_{\max}$ имеет вид

$$N(t) = C_1 \exp(zt) + C_2, \quad (6)$$

где C_1 и C_2 определяются граничными условиями:

$$\begin{cases} N = N_{\max}, & \text{при } t \rightarrow \infty, \\ N(0) = 0. \end{cases} \quad (7)$$

Используя (6) и (7), окончательно получаем

$$N(t) = N_{\max} (1 - \exp(zt)). \quad (8)$$

Величина z зависит от числа столкновений B , приходящихся на один дефект, вероятности встречи парных дефектов G и от отношения числа перемещений, приводящих к отжигу или закреплению, к общему числу смещений η :

$$z = -BG\eta. \quad (9)$$

На основе выражений (7)–(9) описана рекомбинация дефектов на доменных границах.

Разработанные модельные представления о процессах, происходящих в монокристаллических и сегнетокерамических материалах при рентгеновском облучении, учитывают миграцию дефектов в кристаллической фазе под действием комптоновских электронов энергией до 100 кэВ. При этом сокращается время поиска оптимальных режимов обработки материалов, возможно установление общих закономерностей и различий в поведении сегнетокерамических и других типов структур, применяемых в изделиях функциональной электроники.

Заключение

Предложена модель (1), представляющая аналитическое описание влияния различного рода параметров (тепловых, электрических, магнитных и т.д.) на свойства активных диэлектриков, которая позволяет установить параметры технологического процесса и внешние факторы, оказывающие влияние на свойства материалов. Получено выражение для расчета дополнительной погрешности измерения относительной диэлектрической проницаемости, обусловленной отклонением напряженности электрического поля (это отклонение может быть обусловлено прямыми и обратными физическими эффектами, имеющими место в активных диэлектриках) от номинального значения. В свою очередь, указанная дополнительная погрешность снижает воспроиз-

водимость диэлектрических параметров материалов, что негативно влияет на качество технологических процессов. Для минимизации указанного недостатка рассмотрено использование рентгеновского облучения активных диэлектриков, которое в зависимости от дозы облучения приводит к стабилизации диэлектрических параметров (в определенном диапазоне воздействующего электрического поля), что в свою очередь существенно повышает воспроизводимость диэлектрических свойств материалов. Управление свойствами сегнетоэлектриков позволяет разрабатывать и проектировать нано- и микроэлектронные устройства на основе МДП-структур, которые можно использовать в качестве элементов памяти и чувствительных элементов для биохимических сенсоров [10].

Библиографический список

1. Головяшкин, А. Н. Датчики на основе биосенсоров и химически чувствительных полевых транзисторов / А. Н. Головяшкин // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2010. – Т. 1. – С. 459.
2. Васильев, В. А. Частотные преобразователи для датчиков давления на основе нано- и микроэлектромеханических систем : монография / В. А. Васильев, Н. В. Громков, А. Н. Головяшкин. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2011. – 130 с.
3. Печерская, Е. А. Применение методологии функционального и метрологического анализа к качеству исследования материалов микро- и нанoeлектроники / Е. А. Печерская // Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения. – 2007. – Т. 7. – № 2. – С. 94–98.
4. Печерская, Е. А. Метрологические аспекты модели активного диэлектрика / Е. А. Печерская, Д. В. Рябов, Н. Д. Якушова // Инновации на основе информационных и коммуникационных технологий. – 2012. – № 1. – С. 208–213.
5. Печерская, Е. А. Методы и средства исследования активных диэлектриков для наноиндустрии: системный подход : монография / Е. А. Печерская. – Пенза : ПГУ, 2008. – 129 с.
6. Пешиков, Е. В. Законы импульсной переполаризации кристаллов триглицинсульфата / Е. В. Пешиков // Кристаллография. – 1969. – Т. 14, вып. 6. – С. 1074–1077.
7. Kruger, H. A. Influence of the radiation effect on the formation of defects in ferroelectrics / H. A. Kruger, W. R. Cook, C. C. Sartain, H. P. Yocney // J. Appl. Phys. – 1994. – № 34. – 218 p.
8. Головяшкин, А. Н. Электронные процессы в облученной керамике ЦТС / А. Н. Головяшкин, Р. М. Печерская // Тезисы докладов 7-го Международного семинара по физике сегнетоэлектриков-полупроводников. – Ростов/нД., 1996. – С. 133.
9. Голицына, О. М. Влияние рентгеновского излучения на эффективную нелинейность кристаллов группы триглицинсульфата / О. М. Голицына, С. Н. Дрождин // Физика твердого тела. – 2010. – Т. 52, вып. 1. – С. 129–133.
10. Головяшкин, А. А. Расчет порогового напряжения МДП-структуры с учетом парциальных зарядов подвижных носителей заряда / А. А. Головяшкин, А. Н. Головяшкин // Молодой ученый. – 2015. – № 4. – С. 129–132.

Печерская Екатерина Анатольевна
доктор технических наук, профессор,
кафедра нано- и микроэлектроники,
Пензенский государственный
университет
E-mail: peal@list.ru

Pecherskaya Ekaterina Anatolyevna
doctor of technical sciences, professor,
sub-department of nano-
and microelectronics,
Penza State University

Головяшкин Алексей Николаевич
кандидат технических наук, доцент,
кафедра нано- и микроэлектроники,
Пензенский государственный
университет
E-mail: angpenza@gmail.com

Golovyashkin Aleksey Nikolayevich
candidate of technical sciences,
associate professor,
sub-department of nano-
and microelectronics,
Penza State University

Головяшкин Алексей Алексеевич
аспирант,
Пензенский государственный
университет
E-mail: angpenza@gmail.com

Golovyashkin Aleksey Alekseyevich
postgraduate student,
Penza State University

Зинченко Тимур Олегович
магистрант,
Пензенский государственный университет
E-mail: scar0243@gmail.com

Zinchenko Timur Olegovich
undergraduate student,
Penza State University

Печерский Анатолий Вадимович
доктор технических наук, профессор,
кафедра нано- и микроэлектроники,
Пензенский государственный университет
E-mail: ura258@yandex.ru

Pecherskiy Anatoly Vadimovich
doctor of technical sciences, professor,
sub-department of nano-
and microelectronics,
Penza State University

Фимин Андрей Владимирович
магистрант,
Пензенский государственный университет
E-mail: andrey_fimin_pgu@mail.ru

Fimin Andrey Vladimirovich
undergraduate student,
Penza State University

УДК 621.3.088.23

Исследование влияния технологических параметров на воспроизводимость свойств активных диэлектриков / Е. А. Печерская, А. Н. Головяшкин, А. А. Головяшкин, Т. О. Зинченко, А. В. Печерский, А. В. Фимин // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. – 2018. – № 1 (25). – С. 167–177.