**Ланин Виктор Аронович. Старение пьезокерамики системы ЦТС под действием электрических и механических напряжений : диссертация ... кандидата технических наук : 01.04.07.- Томск, 2006.- 144 с.: ил. РГБ ОД, 61 06-5/1305**

**Сибирский государственный университет путей сообщения**

**На правах рукописи**

C:\Users\Pavel\AppData\Local\Temp\Rar$DIa0.297\media\image1.png

**ЛАНИН ВИКТОР АРОНОВИЧ**

**СТАРЕНИЕ ПЬЕЗОКЕРАМИКИ СИСТЕМЫ ЦТС ПОД ДЕЙСТВИЕМ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ и МЕХАНИЧЕСКИХ**

**НАПРЯЖЕНИЙ**

**01.04.07 - физика конденсированного состояния**

**V**

**Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук**

**Научный руководитель доктор технических наук, профессор Плетнев П.М.**

**Томск- 2005**

**СОДЕРЖАНИЕ**

**ВВЕДЕНИЕ. Общая характеристика работы 6**

**ГЛАВА 1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА ПО ЭЛЕКТРИЧЕСКОМУ и МЕХАНИЧЕСКОМУ СТАРЕНИЮ ПЬЕЗОКЕРАМИКИ (Аналитический обзор) 13**

1. **Классификация и свойства пьезокерамических материалов системы ЦТС (PbZr03-PbTi03) 13**
2. **Общая характеристика 13**
3. **Классификация и свойства 15**
4. **Структурные особенности.Изоморфизм. Морфотропная область 18**
5. **Старение пьезокерамики системы ЦТС 20**
6. **Естественное старение 20**
7. **Действие механического напряжения 22**
8. **Влияние электрического поля 24**
9. **Электрическая усталость 26**
10. **Влияние состава и микроструктуры на свойства и старение пьезокерамики 27**

**♦ Влияние модифицирующих ионов 28**

**♦Влияние микроструктуры 30**

1. **Механизмы старения пьезокерамики. Модели старения 32**
2. **Доменный механизм старения 32**
3. **Модель поляризации и старения сегнетокерамики**

**по Окадзаки 36**

1. **Механизм фазовых превращений 40**
2. **Электрохимическое старение 42**

**Выводы 44**

**ГЛАВА 2. ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ СТАРЕНИЯ ... 48**

1. **Характеристики исследуемых образцов 48**
2. **Методы измерения электрофизических параметров 48**
3. **Измерение относительной диэлектрической**

**проницаемости є и диэлектрических потерь tg8 49**

1. **Определение знака поляризации 51**
2. **Измерение пьезомодуля, коэффициента электромеханической связи и механической добротности 52**
3. **Методы исследования старения пьезокерамики 54**
4. **Режимы нагружения пьезокерамических образцов 54**
5. **Рабочая ячейка для образцов при электрическом**

**нагружении 57**

1. **Проведение испытаний в режимах постоянного (Е.) и переменного (Е~) электрического поля 58**
2. [**Ускоренный режим 59**](#bookmark3)
3. **Одновременное воздействие механического напряжения сжатия и**

**электрического поля 60**

1. [**Погрешность измерений 62**](#bookmark4)
2. **Методика измерения амплитуды резонансных колебаний и температу­ры разогрева пьезокерамических образцов 63**
3. **Измерение амплитуды колебаний 63**
4. **Измерение температуры разогрева образцов 64**

**ГЛАВА 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ СТАРЕНИЯ ПЬЕЗОКЕРАМИКИ В РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМАХ ДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И МЕХАНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ 67**

1. [**Критерии старения пьезокерамики 67**](#bookmark5)
2. **Старение ПК ЦТС под действием внешнего электрического поля 69**
3. **Постоянное электрическое поле 69**

* **Длительный периодический режим (слабые и средние поля) 71**
* **Слабые и средние поля, непрерывный режим 73**
* **Сильные электрические поля 77**

**♦Интерпретация результатов старения ПК в сильных электрических полях 82**

1. **Переменное электрическое поле 84**
2. **Сегнетожесткость и электрическое старение 89**
   1. **Старение пьезокерамики под воздействием одноосных механических**

**напряжений 94**

* + 1. **Ступенчатый режим нагружения и разгрузки 95**
    2. **Длительное статическое нагружение 96**
    3. **Проверка гипотезы структурно-фазовых переходов при старении пьезокерамики 98**

**Выводы 103**

**ГЛАВА 4. СТАРЕНИЕ ПЬЕЗОКЕРАМИКИ ПРИ ОДНОВРЕМЕІШОМ ДЕЙСТВИИ МЕХАНИЧЕСКИХ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ 106**

1. **Статическая нагрузка 40МПа) + постоянное электрическое поле (Е=ЗООВ/мм), режим по Е - прерывисто-периодический 106**
2. **Статическая нагрузка (аСж= 40МПа) + постоянное электрическое поле (Е=300В/мм), непрерывный режим 110**
3. **Совместное действие механического напряжения сжатия и перемен­ного электрического ПОЛЯ 113**
4. **Статическая нагрузка (асж= 40МПа) + переменное электрическое поле (Г=1кГц, Е\_=300В/мм), режим по полю прерывисто-периоди­ческий 114**
5. **Статическая нагрузка (Стс\*11140МПа) + переменное электрическое поле ( f=1кГд, Е\_=300В/мм), непрерывный режим 115**

**Выводы 117**

**ГЛАВА 5. ВЛИЯНИЕ ПЕРЕМЕННОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО И СТАТИ­ЧЕСКОГО МЕХАНИЧЕСКОГО НАПРЯЖЕНИЙ НА РЕЗОНАНСНУЮ АМПЛИТУДУ КОЛЕБАНИЙ И ТЕМПЕРАТУРУ РАЗОГРЕВА ПЬЕЗО -**

**КЕРАМИКИ ЦТС-19 119**

1. **Амплитудно-частотная характеристика колебаний пьезодисков из**

**ПК ЦТС-19. Эффект насыщения по электрическому напряжению 120**

1. **Температура разогрева образцов пьезокерамики 121**
2. **Амплитудно-температурные характеристики пьезокерамики при длительном воздействии переменного электрического напряжения и статической механической нагрузки 123**

**Выводы 126**

**ОБЩИЕ ВЫВОДЫ 127**

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ 129**

**ПРИЛОЖЕНИЕ 140**

**ВВЕДЕНИЕ (Общая характеристика работы)**

**Актуальность работы. В настоящее время трудно перечислить области науки и техники, где бы не использовались электроакустические преобразователи и устройства на основе пьезокерамики (ПК).**

**Со времени открытия пьезосвойств у заполяризованной сегнетокерамики титаната бария (ВаТіОз) усилия исследователей были направлены в основном на разработку других составов, обладающих лучшим комплексом свойств.**

**Широкое распространение получили высокоэффективные ПК материалы на основе твердых растворов цирконата и титаната свинца с различными модифи­цирующими добавками (система ЦТС).**

**Расширение областей применения и ужесточение эксплуатационных ре­жимов ПК требует, наряду с повышением уровня ее свойств, знаний о ее устой­чивости к действию различных внешних факторов: температурных, влажност­ных, механических, электрических, радиационных и т.д. Воздействие ряда факторов можно если не исключить полностью, то по крайней мере застабили- зировать; избежать же электрических напряжений и механических деформаций ПК нельзя в *принципе*, так как они лежат в природе пьезоэффекта (прямого и обратного).**

**Процесс изменения во времени основных электрофизических параметров ПК при длительном воздействии на нее внешних факторов (или же после сня­тия таких воздействий) принято называть общим термином - старение.**

**Проблема электрического и механического старения пьезокерамики (в том числе и системы ЦТС) еще изучена недостаточно и практически не освещена в научной литературе. В классической монографии по пьезокерамике Б.Яффе и др. [**1**], эта проблема лишь обозначена, авторы касаются в основном *естест­венного старения* “девственной ” пьезокерамики сразу после снятия поляри­зующего электрического поля.**

**Ограниченные сведения о старении ПК встречаются в отечественных мо­нографиях И.А. Глозмана [2] и Е.Г. Смажевской, Н.Б. Фельдмана [35], издан­ных еще ранее. Но и здесь акцент сделан больше на *естественное* и *темпера­турное* старение ПК. По электрическому и механическому старению приведе­ны лишь некоторые экспериментальные данные для пьезокерамики титаната бария и для ряда составов ЦТС.**

**Наибольший вклад в изучение свойств пьезокерамики системы ЦТС вне­сли ученые Ростовской школы (Ростовский государственный университет ) по пьезокерамике (основатель Фесенко Е.Г.), но их интересы направлены больше на поиск и синтез новых составов сегнетопьезокерамики, обладающей высоки­ми (а иногда - и уникальными) пьезосвойствами.**

**По нашему мнению, трудности в анализе и обобщении экспериментальных результатов по старению ПК во многом связаны со следующими факторами:**

* **многообразием исследуемых составов даже в пределах только перовскитовых структур;**
* **широким диапазоном величин электрических и механических воздействий на ПК образцы (от слабых измерительных до разрушающих) и различием эксплуатационных режимов их применения (непрерывный, импульсный, сту­пенчатый, циклический);**
* **несогласованностью относительно *критериев старения -* конкретного набора электрофизических параметров, по которым можно оценивать *степень* старе­ния;**
* **не всегда четко обозначаемым различием между изменением сегнетоэлек- трических характеристик материала и старением заполяризованного образца ПК на его основе. Так, если образец ПК полностью деполяризован за счет тем­пературных, электрических или механических воздействий, то по сути это оз­начает его “смерть” как пьезоэлектрика, хотя чисто диэлектрические характе­ристики материала (диэлектрическая проницаемость є, диэлектрические поте­ри tg**8**, удельное сопротивление р) могут оставаться на прежнем уровне;**
* **существующие теоретические модели старения сегнетопьезокерамики - “логарифмическая”, “релаксационная” (с одним или несколькими временами релаксации) по существу являются феноменологическими и не привязаны к конкретным механизмам старения;**
* **различием в методиках проведения испытаний и их аппаратурным оформле­нием.**

**Ассортимент различных устройств с использованием пьезокерамических преобразователей постоянно увеличивается. В то же время за последние 15-20 лет в отечественной и зарубежной научной литературе число работ по иссле­дованию устойчивости пьезокерамических материалов к длительному воздей­ствию электрических и механических нагрузок существенно сократилось. Это необъяснимое противоречие повышает важность и актуальность изучения ста­рения ПК в условиях повышенной жесткости внешних факторов. Многие явле­ния в этом сложном и многогранном процессе остаются неясными. Для более глубокого понимания механизма структурных и доменных изменений, проте­кающих в ПК под действием электрических и механических напряжений, не­обходимо системное накопление экспериментальных данных и их обобщение.**

**Работа выполнялась в рамках госбюджетной тематики на кафедре “Фи­зика» НГАСУ - НИСИ в 1980-92 гг. и по заказам предприятий НПО “ Электро­прибор”, г. Ленинград и завод “Радиодетали”, г.Волгоград.**

**Цель работы. Установление диапазона предельно допустимых электри­ческих и механических напряжений воздействия на пьезокерамику системы ЦТС для обеспечения длительной стабильной работы пьезоэлементов на ее ос­нове.**

**Основные задачи. В соответствии с поставленной целью решались сле­дующие задачи:**

* **анализ имеющихся экспериментальных данных и теоретических положений по электрическому и механическому старению пьезокерамических материалов со структурой типа *перовскита;***
* **выбор и обоснование основных критериев (параметров) старения пьезокера­мики (ПК);**
* **разработка экспериментальных устройств и методик для исследования старе­ния пьезокерамики в различных режимах воздействия электрических и механи­ческих напряжений;**
* **получение и анализ экспериментальных результатов по старению пьезокера­мики различных составов системы ЦТС в условиях их длительного механиче­ского и электрического нагружения;**
* **выявление общих зависимостей и особенностей процессов старения пьезома­териалов системы ЦТС и их обоснование в рамках существующих теоретиче­ских положений по механизмам (моделям) старения пьезосегнетокерамики;**
* **выбор наиболее устойчивых к длительным электрическим и механическим нагрузкам составов пьезокерамики ЦТС.**

**Научиая новизна. В развитие представлений о физической природе вы­нужденного старения пьезокерамики системы ЦТС под действием электриче­ских и механических напряжений получены следующие научные результаты:**

1. **Сформулированы представления о природе вынужденного старения пьезоке­рамики системы ЦТС на основе доменного механизма, моделей поляризации и естественного старения и фазовых превращений твердых растворов PB(Ti,Zr)C**>3 **в области морфотропного перехода.**
2. **Установлено, что в слабом (Е < 300 В/мм) электрическом поле (постоянном и переменном), значительно меньшим коэрцитивного Ес, а также в постоянном поле средней напряженности (Е «300-І-600 В/мм) в режиме установки образцов “по полю” (ЕТТрг) критических изменений пьезосвойств керамики системы ЦТС не происходит. Фиксируемые в процессе электрического нагружения из­менения диэлектрических параметров имеют обратимый характер с малым временем релаксации (несколько часов). Существенные изменения пьезос­войств керамики системы ЦТС происходят при действии механической нагруз­ки сжатия и сильного (Е > Ес) постоянного электрического поля в режиме “ против поля” ((EtlPr). Длительное (т > 250 час) механическое нагружение сжатия (асж~ 40-г50 МПа) вызывает деполяризацию образцов ПК с потерей ре­зонансных свойств и существенным ухудшением диэлектрических характери­стик. Процесс старения носит практически необратимый характер.**
3. **Впервые установлены зависимости изменения диэлектрических (є и tgS) и пьезосвойств ( Кр, d3i, QM) ПК ЦТС от величины и длительности одновремен­ного воздействия механической нагрузки и электрического поля. Наибольшей устойчивостью к действию электрических и механических напряжений облада­ет керамика марок ЦТС-19 и ЦТС-22. Она удовлетворительно сохраняет ди­электрические и пьезосвойства при совместном действии сжимающей нагрузки с\*сж~ 40 МПа в течение 1200-И500 час и электрического поля Е -300 В/мм (по­стоянного или переменного частотою f=1 кГц) в течение 500-И000 час.**
4. **Установлен “эффект компенсации”, который вносит переменное электриче­ское поле в изменения параметров, вызванные механической нагрузкой. Сте­пень компенсации зависит от величины напряжения сжатия, напряженности электрического поля и, а также от состава пьезокерамики.**
5. **Выявлено, что устойчивость пьезокерамики системы ЦТС к длительному электрическому и механическому воздействию не имеет четкой взаимосвязи с принятой классификацией ПК по категории “сегнетожесткости”. Пьезокерами­ка марки ЦТС-19, относящаяся к “ сегнетомягкой”, является наиболее устойчи­вой к эксплуатационному старению.**

6 **. Установлено, что наибольшей устойчивостью к длительному действию ме­ханической и электрической нагрузок обладает пьезокерамика с мелкозерни­стой структурой (составы ЦТС-12 и ЦТС-22), которая обеспечивается не ском­пенсированными добавками Nb**2**0**5 **и Сг20з. Для составов ЦТБС-3 и ЦТСНВ-1 изоморфные замещения РЬ2+ в решетке перовскита на катионы Ва2+, Na+, Bi3+ способствуют повышению дефектности твердого раствора Pb(Zr,Ti)03, увели­чению среднего размера зерна и созданию напряженного, метастабилыюго со­стояния материала, что отрицательно сказывается на стабильности свойств этих марок пьезокерамики.**

**Практическая значимость работы.**

1. **Разработаны экспериментальные устройства и предложены методики прове­дения испытаний пьезокерамических образцов на ускоренное и длительное вынужденное старение под действием электрических и механических нагрузок.**
2. **Определены диапазоны допустимых электрических и механических напря­жений для ряда промышленных составов пьезокерамики системы ЦТС (марки ЦТС-19, ЦТС-22, ЦТБС-3, ЦТСНВ-1) и выданы рекомендации по применению их в качестве надежных материалов пьезоэлементов для различных приборов.**
3. **Выданы практические рекомендации (НПО “Электроприбор44) по выбору ус­тойчивых к вынужденному старению составов ПК ЦТС-19 и ЦТС-22 в качестве вибронесущих элементов безрасходных подшипников специальных устройств. Для обеспечения максимально стабильной амплитуды колебаний ПК элемента были оптимизированы его рабочие параметры - частота и амплитуда перемен­ного электрического поля.**

**На защиту выносятся.**

1. **Выбор и обоснование критериев (параметров) вынужденного старения пьезо­керамики.**
2. **Разработанные устройства и методики испытания пьезокерамических образ­цов на длительное старение под действием электрических и механических на­грузок.**
3. **Экспериментальные результаты по длительному стареншо пьезокерамиче­ских материалов системы ЦТС в различных режимах воздействия электриче­ских и механических напряжений.**
4. **Предложенные представления о природе вынужденного старения пьезокера­мики системы ЦТС на основе теоретических положений доменного механизма, моделей поляризации и естественного старения по Окадзаки и фазовых пре­вращений твердых растворов в морфотропной области по Исупову.**
5. **Особенности влияния модифицирующих добавок на устойчивость пьезоке­рамики ЦТС к действию механических и электрических нагрузок.**

**Достоверность полученных в диссертации результатов и обоснованность научных и практических выводов определяются: использованием методов из­мерения электрофизических параметров образцов ПК в соответствии с ГОСТа­ми; проведением каждого из режимов принудительного старения на большом количестве образцов ПК из одной партии, а также корректировкой изменения параметров по контрольным образцам на естественное старение; привлечением (для интерпретации полученных экспериментальных данных) принятых теоре­тических представлений по структуре и механизмам старения сегнетопьезоке­рамики.**

**Апробация работы. Основные результаты работы были доложены и об­суждены: на ежегодных научно-технических конференциях профессорско- преподавательского состава Новосибирского государственного архитектурно­строительного университета (прежнее название - НИСИ) в 1981-88гг., на еже­годных региональных научно-технических конференциях радиотехнического общества имени А. Попова, посвященных Дню Радио (1981-1985 гг.), г. Ново­сибирск, научно-технических конференциях профессорско-преподавательского состава Сибирского государственного университета путей сообщения (2003­2005 гг.).**

**Публикации. По теме диссертации опубликовано 10 работ, в том числе три статьи в реферируемых центральных изданиях и две депонированные руко­писи.**

**Объем и структура диссертации. Материал диссертации изложен на 140 страницах машинописного текста и состоит из введения, пяти глав, общих выводов, списка литературы из 110 наименований и приложения. Диссертация содержит 40 рисунков и 20 таблиц.**

**ОБЩИЕ ВЫВОДЫ**

1. **В качестве основных критериев старения пьезосегнетокерамики могут быть приняты следующие электрофизические характеристики: а) для оценки диэлектрических свойств - относительная диэлектрическая проницаемость є и диэлектрические потери tgS, как высокочувствительные показатели струк­турных изменений материала; б) для оценки пьезосвойств - пьезомодуль d3i (d 33), коэффициент электромеханической связи Кр и механическая доброт­ность QM, как комплекс основных параметров пьезоэффекта.**
2. **Наибольшей устойчивостью к действию электрических и механических напряжений обладает керамика промышленных составов ЦТС-19 и ЦТС-22. Она удовлетворительно сохраняет диэлектрические и пьезосвойства при со­вместном действии сжимающей нагрузки 40 МПа в течение 1500-2000 час и электрического поля 300 В/мм (постоянного или переменного f=1 кГц) в те­чение 500-1000 час.**
3. **Пьезокерамика составов ЦТБС-3 и ЦТСНВ-1 претерпевает существенные изменения диэлектрических (е до 20%, tg**8 **до 80-100%) и пьезосвойств (Кр, (J**31 **до 30-40 %) при наложении комбинированной нагрузки (асж+Е); при этом определяющим фактором является механическое нагружение (сгсж=40 МПа).**
4. **Наиболее существенные изменения пьезосвойств для всех составов пьезо­керамики происходят при действии механической нагрузки и постоянного электрического поля в режиме установки образов “против поля”.**
5. **Вызываемое механической нагрузкой ухудшение пьезосвойств керамики системы ЦТС может быть частично восстановлено воздействием переменно­го (f =1 кГц) электрического поля. “Эффект компенсации”, установленый впервые настоящим исследованием, зависит от величины напряжения сжа­тия, напряженности поля и состава пьезокерамики.**
6. **Наибольшей устойчивостью к длительному действию механической и электрической нагрузок обладает пьезокерамика с мелкозернистой (с1зер = 3-5 мкм) структурой, которая обеспечивается добавками Nl^Os и Сг20з в соста­вах ЦТС-19 и ЦТС-22. Для составов ЦТБС-3 и ЦТСНВ-1 изоморфные заме­щения РЬ2+ в решетке перовскита на катионы Ва2+, Na+, Bi3+ с достаточно большими ионными радиусами способствуют повышению дефектности твер­дого раствора Pb(Zr,Ti)C>**3**, увеличению среднего размера зерна и созданию напряженного, метастабильного состояния материала, что отрицательно ска­зывается на стабильности свойств этих составов пьезокерамики.**
7. **Изменения диэлектрических и пьезосвойств ПК ЦТС от величины и дли­тельности механических и электрических нагрузок могут быть интерпрети­рованы в рамках взаимосвязанных теоретических положений о доменной структуре сегнетоматериала, моделей поляризации и старения по Окадзаки, а также с учетом вынужденных фазовых превращений в области морфотропно- го перехода твердых растворов PB(Ti,Zr)03 по Исупову.**
8. **Полученные экспериментальные данные по вынужденному старению пье­зокерамики различных составов системы ЦТС свидетельствуют об отсутст­вии четкой взаимосвязи между категорией сегнетожесткости и устойчиво­стью материала к длительным внешним воздействиям.**
9. **Результаты по электрическому и механическому старению пьезокерамики системы ЦТС могут быть использованы для прогнозирования устойчивости к внешним воздействиям пьезосегнетоматериалов других (не перовскитовых) структур, но относящихся к материалам с доменным строением.**

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. **Яффе Б., Кук У., Яффе Г. Пьезокерамическая керамика. Пер. с англ. М.: Мир, 1974. С. 280.**
2. **Глозман И.А. - Пьезокерамика. М.: Энергия, 1972, с.288 .**
3. **Гавриляченко В.Г. Электрическая усталость в сегнетоэлектрических твердых растворах / В.Г.Гавриляченко, Л.А.Резниченко // Международная науч.- практ. конференция “Пьезотехника - 97 ”, Москва- 1997, с. 292-296.**
4. **Mason W. Р. // J. Acoust.Soc.Am , 1955, v.27 , N1, р.73-85.**
5. **IkedaT. // J. Phys. Soc.Japan ,1958, v.13, p. 309.**
6. **Киттель Ч. Введение в физику твердого тела. Пер. с англ. М.: Физматгиз. -1962, с.696.**
7. **Jaffe Н., Berlincourt D. -«Proc. IRE», 1960, v.48, p. 220-229.**
8. **Фесенко Е.Г., Данцигер А.Я., Разумовская О.Н. Новые пьезокерамические материалы.- Ростов на-Дону, 1983, с. 156 .**
9. **Данцигер А.Я., Разумовская О.Н.,Резниченко Л.А. Высокоэффективные пьезокерамические материалы. Оптимизация поиска. - Ростов -на-Дону: Изд-во “ Пайк”.- 1995, с. 94.**
10. **Данцигер А.Я. Роль объемного заряда и размеров кристаллитов в формировании свойств сегнетопьезокерамических материалов /А.Е.Данцигер, В.З. Бородин, Л.А.Резниченко //Сб.трудов международной науч.- практ. конференции “Пьезотехника- 97 ”, -Москва, 1997.**
11. **Окадзаки К. Технология керамических диэлектриков. -М.: Энергия, 1976, с.336.**
12. **Исупов В. А. Особенности сосуществования тетрагональной и ромбоэдрической фаз в пьезокерамике на основе РвТіОз и PbZt**03 **// ФТТ.- 1976, т.18, N5. - С. 921-926.**
13. **Исупов В.А., Влияние электрических полей и механических напряжений на фазовый состав пьезокерамики типа ЦТС. // Сб. трудов**

**Международной научно-практ. конференции “ Пьезотехника 97“ - Москва, Обнинск, 1997.- С.37-40.**

1. **Meyerhofer D. -< Phys Rev>, 1958, v.l 12, p.413-423.**
2. **Devonshire A.F. -< Adv. Phys.>, 1954, v.3, p. 85-130.**
3. **Сивухин Д.В. Общий курс физики: т.З, “ *Электричество* “ , М.: -Наука, 1983, с. 171-172.**
4. **Балыгин И.Е. Электрические свойства твердых диэлектриков.- Энергия, 1974, с. 190.**
5. **Pogorzelska J. Aging effects in rutile ceramics. / Szklo і ceramica / - 1975 , p. 313-317.**
6. **Fraser D.B., Maldonado J.R. / J.Appl. Phys./ - v.41, N5, 1970, p.2172 .**
7. **Койков C.H., Цикин A.H. Электрическое старение твердых диэлектриков. Энергия, 1968, с. 189.**