

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ОБЪЕДИНЕННОГО ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 99.2.018.02,

созданного на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Российский государственный педагогический университет им. А. И. Герцена» Министерства просвещения Российской Федерации и федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет ИТМО» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации **по диссертации на соискание ученой степени кандидата наук**

аттестационное дело № _____

решение диссертационного совета от 19 января 2023 г. протокол № 1

О присуждении Сотовой Юлии Ильиничне,
гражданке Российской Федерации,
ученой степени кандидата физико-математических наук

Диссертация «Коронаэлектретное состояние и его влияние на пьезоэлектрические свойства в сополимере винилиденфторид-тетрафторэтилен» по специальности 1.3.8. Физика конденсированного состояния принята к защите 11 ноября 2022 года, протокол № 12 объединенным диссертационным советом 99.2.018.02, созданным на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Российский государственный педагогический университет им. А. И. Герцена» Министерства просвещения Российской Федерации (191186, Санкт-Петербург, наб. р. Мойки, 48) и федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет ИТМО» Министерства науки

и высшего образования Российской Федерации (197101 Санкт-Петербург, Кронверкский пр., д. 49) приказ № 248/нк от 03.03.2016 г.

Соискатель Сотова Юлия Ильинична, 29 декабря 1992 года рождения.

В 2017 году соискатель с отличием окончила федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный педагогический университет им. А. И. Герцена». Присвоена квалификация магистр по направлению подготовки 03.04.02 Физика.

В 2021 году окончила федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный педагогический университет им. А. И. Герцена», освоила программу подготовки научно-педагогических кадров в аспирантуре по направлению подготовки 03.06.01 Физика и астрономия, присвоена квалификация «Исследователь. Преподаватель-исследователь».

С 01.09.2018 по настоящее время Сотова Юлия Ильинична работает специалистом по учебно-методической работе в институте физики федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Российский государственный педагогический университет им. А. И. Герцена».

Диссертация выполнена на кафедре общей и экспериментальной физики института физики федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Российский государственный педагогический университет им. А. И. Герцена» Министерства просвещения Российской Федерации.

НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ – ГОРОХОВАТСКИЙ ЮРИЙ АНДРЕЕВИЧ, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой общей и экспериментальной физики института физики федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Российский государственный педагогический университет им. А. И. Герцена».

ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ:

- КОМОЛОВ АЛЕКСЕЙ СЕРГЕЕВИЧ, доктор физико-математических наук, доцент, профессор кафедры электроники твердого тела федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет».

- ПРОНИН ИГОРЬ ПЕТРОВИЧ, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории физики сегнетоэлектричества и магнетизма федерального государственного бюджетного учреждения науки «Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе Российской академии наук».

Дали положительные отзывы на диссертацию.

ВЕДУЩАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тверской государственный университет», г. Тверь в своем положительном отзыве, подписанным доктором физико-математических наук, профессором кафедры физики конденсированного состояния Солнышкиным Александром Валентиновичем, доктором физико-математических наук, профессором, заведующим кафедрой физики конденсированного состояния Пастушенковым Юрием Григорьевичем указала, что в диссертационной работе проведено комплексное исследование электретных и пьезоэлектрических свойств пленок сополимера винилиденфторид-тетрафторэтилен (П(ВДФ-ТФЭ)), на основе чего предложена модель релаксации короноэлектретного состояния в данном материале. Также в работе показано влияние короноэлектретного состояния на пьезоэлектрические свойства П(ВДФ-ТФЭ).

При расчете параметров полярных структур и глубоких приповерхностных ловушек с помощью традиционных и численных методов обработки экспериментальных данных установлено, что в П(ВДФ-ТФЭ) имеется два сорта полярных структур, различающихся значениями энергии активации и частотного фактора.

Помимо этого, в диссертационной работе проведено исследование влияния скорости предварительной ориентационной вытяжки на электретные и пьезоэлектрические свойства П(ВДФ-ТФЭ). Обнаружено, что увеличение скорости ориентационной вытяжки полимерных пленок приводит к росту пьезомодуля d_{33} .

Значимость полученных результатов для науки и практики заключается в том, что автор вносит вклад в развитие физики пьезоэлектрического состояния в полимерных материалах. Теоретическая значимость проведенного исследования состоит в описании физических механизмов формирования и релаксации короноэлектретного состояния, а также влияния короноэлектретного состояния на пьезоэлектрические свойства П(ВДФ-ТФЭ). Практическая значимость полученных результатов определяется тем, что в работе предложен способ поляризации полимерных пленок П(ВДФ-ТФЭ), который позволяет значительно снизить вероятность повреждений пленок. Помимо этого, в диссертационном исследовании экспериментально определены оптимальные условия поляризации и реологические параметры полимерных пленок (ВДФ-ТФЭ), при которых исследуемые материалы обладают наилучшими пьезоэлектрическими характеристиками.

Ряд полученных в ходе выполнения работы результатов могут быть использованы на предприятиях, занимающихся разработкой изделий электронной техники на основе пьезоэлектрических полимерных пленок, и научных центрах, проводящих фундаментальные и прикладные исследования в соответствующих областях знаний. К числу таковых можно отнести Институт кристаллографии имени А.В. Шубникова РАН (г. Москва), ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МИЭТ» (г. Зеленоград), ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС» (г. Москва), ФГАОУ ВО «Южный федеральный университет» (г. Ростов-на-Дону), ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет» (г. Воронеж), ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет» и др.

По теме диссертации опубликовано 4 работы общим объемом 3,23 п.л. авторский вклад 2,20 п.л., из в изданиях, индексируемых в Web of Science и Scopus, в рецензируемых журналах, включенных в перечень изданий, рекомендованных ВАК опубликовано 4 статьи (3,23 п.л./ 2,20 п.л.). В диссертации отсутствуют недостоверные сведения об опубликованных соискателем ученой степени работах.

Наиболее значимые работы:

1. **Sotova Yu. I. Thermally stimulated depolarization data analysis: Simmons method and weak regularization method by Tikhonov / Yu.A. Gorokhovatsky, D.E. Temnov, Yu.I. Sotova, A.A. Rychkov, A.E. Kuznetsov // Университетский научный журнал. – 2018. – № 37. – С. 40-48. (1,04 п.л./ 0,2 п.л.)**
2. **Sotova Yu. I. Rheological parameters' effect on the electret properties of pol-yvinylidene fluoride / Yu.A. Gorokhovatsky, D.E. Temnov, Yu.I. Sotova // St.Petersburg Polytechnic University journal. Physics and mathematics (рус. Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Физико-математические науки). – 2020. – Т. 13. – № 4. – С. 39-46. (0,92 п.л./ 0,8 п.л.) <https://doi.org/10.18721/JPM.13403>**
3. **Sotova Y. Effect of stretching rate on charge relaxation in PVDF films / Y. Gorokhovatsky, A. Gulyakova, Y. Sotova, D. Temnov, V. Shabanov // AIP Conference Proceedings. – 2020. – Vol. 2308. – № 1. – P. 030004 (1-4). (0,23 п.л./ 0,2 п.л.) <https://doi.org/10.1063/5.0033478>**
4. **Сотова Ю.И. Роль электретного эффекта в формировании пьезоэлектрического состояния в пленках сополимера поливинилиденфторида с тетрафторэтиленом / Сотова Ю.И., Гороховатский Ю.А., Темнов Д.Э. // St.Petersburg Polytechnic University journal. Physics and mathematics (рус. Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Физико-математические науки). – 2022. – Т. 15. – № 2. – С. 8-16. (1,04 п.л./ 1,0 п.л.) <https://doi.org/10.18721/JPM.15201>**

На диссертацию и автореферат поступило 4 отзыва, их прислали:

1. Кандидат физико-математических наук, преподаватель кафедры физики федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского» Фомичева Елена Егоровна.

Отзыв положительный. Содержит замечание:

- На рисунке 2 рост тока на начальном участке кривой 4 (температура поляризации 80°C) начинается существенно раньше, чем на кривых, полученных при меньших температурах поляризации. С чем это связано?
- На рисунке 3 приведена функция распределения, восстановленная методом слабой регуляризации Тихонова. На ней присутствуют два максимума, соответствующие двум типам полярных структур. Но ранее на той же странице автореферата сказано, что параметры структур с меньшей энергией активации ($0,825\text{ эВ}$ и 10^{10} Гц), соответствующие левому максимуму, определялись еще и методом варьирования скорости нагревания. Зачем для определения параметров этих структур использовалось два метода?

2. Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой инженерного материаловедения и метрологии, научный руководитель лаборатории механики ориентированных полимеров федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна» Цобкалло Екатерина Сергеевна.

Отзыв положительный. Содержит замечания:

- В автореферате следовало указать на связь пьезоэлектрической альфа и бета фаз конформацией цепей: *trans* (Т) или *gauche* (G). В связи с этим приобрело бы более четкий структурный смысл используемый автором термин «полярные структуры».
- Как автор может прокомментировать известное отрицательное значение пьезоэлектрического отклика в ПВДФ?

3. Доктор физико-математических наук, доцент, профессор высшей школы электроники и микросистемной техники федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» Сударь Николай Тобисович.

Отзыв положительный. Содержит замечание:

- На стр. 17 автореферата отмечается, что ловушечными состояниями в исследуемом материале являются структурные дефекты, но более детально физическая природа их не обсуждается.

4. Доктор технических наук, профессор кафедры нанoeлектроники, директор НОЦ «Технологический центр» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «МИРЭА – Российский технологический университет» Воротилов Константин Анатольевич.

Отзыв положительный. Отзыв без замечаний.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается их компетентностью и достижениями в соответствующей отрасли науки, наличием публикаций в соответствующей сфере исследования, а также решением объединенного диссертационного совета 99.2.018.02 от 11 ноября 2022 г. протокол № 12 в соответствии пунктам 22, 24 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденным постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842 (в действующей редакции).

***ДИССЕРТАЦИОННЫЙ СОВЕТ ОТМЕТИЛ, ЧТО НА ОСНОВАНИИ
ВЫПОЛНЕННЫХ СОИСКАТЕЛЕМ ИССЛЕДОВАНИЙ***

– **установлено**, что в процессе поляризации пленок сополимера винилиденфторид-тетрафторэтилен в поле коронного разряда при повышенной температуре осуществляется захват гомозаряда глубокими приповерхностными

ловушками; во внутреннем электрическом поле гомозаряда происходит ориентация и удержание ориентированного состояния полярных структур сополимера;

– **выявлено**, что в сополимере винилиденфторид-тетрафторэтилен имеется два сорта полярных структур, различающихся значениями энергии активации и частотного фактора ориентационного процесса: для полярных структур первого сорта энергия активации составляет $(0,83 \pm 0,03)$ эВ, частотный фактор 10^{10} с^{-1} ; для полярных структур второго сорта энергия активации составляет $(0,89 \pm 0,04)$ эВ, частотный фактор 10^{11} с^{-1} ;

– **установлено**, что формирование пьезоэлектрического и электретного состояния в сополимере винилиденфторид-тетрафторэтилен взаимосвязано: создание электретного состояния является необходимым условием для появления и удержания пьезоэлектрических свойств;

– **обнаружено**, что стабильность пьезоэлектрического состояния в сополимере винилиденфторид-тетрафторэтилен обусловлена в первую очередь ориентацией полярных структур с меньшей энергией активации;

– **показано**, что увеличение скорости предварительной ориентационной вытяжки (до 200%/мин) приводит к росту концентрации глубоких приповерхностных ловушек, что обуславливает улучшение электретных и пьезоэлектрических свойств сополимера винилиденфторид-тетрафторэтилен.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

в работе **предложена физическая модель**, описывающая механизмы формирования и релаксации короноэлектретного состояния и его влияния на пьезоэлектрические свойства в сополимере винилиденфторид-тетрафторэтилен.

Значение полученных результатов исследования для практики подтверждается тем, что:

– в работе **определены** оптимальные условия поляризации и реологические параметры полимерных пленок на основе сополимера винилиденфторид-тетрафторэтилен, позволяющие добиться в исследуемых материалах высоких пьезоэлектрических и электретных характеристик;

– **предложен** способ поляризации полимерных пленок сополимера винилиденфторид-тетрафторэтилен во внутреннем поле гомозаряда, значительно снижающий вероятность механических повреждений образцов и, вместе с тем, позволяющий добиться объектах исследования высокого и стабильного значения пьезомодуля d_{33} (порядка 25 пКл/Н).

Достоверность результатов исследования обусловлена тем, что:

– в работе применялись современные высокочувствительные методы исследования: метод термостимулированных токов короткого замыкания, метод термостимулированной релаксации поверхностного потенциала, метод инфракрасной спектроскопии, квазистационарный метод измерения пьезомодуля, что позволило провести комплексное исследование электретных и пьезоэлектрических свойств сополимера винилиденфторид-тетрафторэтилен;

– интерпретация результатов исследования основана на анализе большого количества полученных соискателем экспериментальных данных, проведении поляризации при различных температурах поляризации и сравнительном анализе электретных и пьезоэлектрических свойств сополимера винилиденфторид-тетрафторэтилен с различными скоростями предварительной ориентационной вытяжки.

Личный вклад соискателя состоит в его непосредственном участии во всех этапах исследования:

– в поиске и анализе литературных данных, посвященных структурным и электрофизическим свойствам поливинилиденфторида и его сополимера с тетрафторэтиленом;

– в постановке и организации основных этапов исследования;

– в получении экспериментальных данных;

– в обобщении и анализе полученных результатов, разработке интерпретаций и моделей;

– в подготовке публикаций по результатам исследования.

Диссертация соответствует критерию внутреннего единства, что подтверждается:

- обоснованностью актуальности изучаемой проблемы;
- последовательным планом исследования;
- постановкой научной задачи физики конденсированного состояния, связанной с выявлением взаимосвязи процессов релаксации короноэлектретного и пьезоэлектрического состояний в сополимере винилиденфторид-тетрафторэтилен;
- использованием современных высокочувствительных экспериментальных методов исследования;
- аргументированностью и полнотой выводов.

Диссертация Сотовой Юлии Ильиничны является самостоятельной, завершенной научно-квалификационной работой, в которой проведено комплексное исследование короноэлектретного состояния в сополимере винилиденфторид-тетрафторэтилен, влияния короноэлектретного состояния на пьезоэлектрические свойства данного сополимера, и предложены пути повышения стабильности короноэлектретного (и, как следствие, пьезоэлектрического) состояния. Полученные экспериментальные результаты исследования вносят вклад в развитие физики пьезоэлектрического состояния в полимерных материалах.

В ходе защиты диссертации были высказаны некоторые критические замечания и заданы вопросы, касающиеся:

- отсутствия в диссертации данных о временной стабильности электретного и пьезоэлектрического состояния исследуемых пленок при комнатной температуре;
- рекомендации провести оценку вклада пьезоэлектрического эффекта в полученные экспериментальные зависимости термостимулированных токов короткого замыкания;
- как производилось измерение пьезоэлектрического модуля d_{33} и определялась его погрешность.

Соискатель Сотова Ю.И. ответила на задаваемые ей в ходе заседания вопросы и привела собственную аргументацию, пояснив следующее:

– в работе исследована температурная стабильность электретного и пьезоэлектрического состояния. В дальнейшем планируется провести исследование временной релаксации электретного и пьезоэлектрического состояния при комнатной температуре;

– целью данной работы было исследование в первую очередь короноэлектретного состояния в сополимере П(ВДФ-ТФЭ) и его связи с пьезоэлектрическими свойствами. Однако в ходе дальнейших исследований будет учтен вклад пьезоэлектрического эффекта в термостимулированные токи короткого замыкания;

– пьезомодуль измерялся с помощью квазистационарного метода в различных точках образца, за итоговую величину пьезомодуля принималось среднее значение, а разброс значений составлял погрешность.

На заседании 19 января 2023 года диссертационный совет пришел к выводу о том, что диссертация Сотовой Юлии Ильиничны «Короноэлектретное состояние и его влияние на пьезоэлектрические свойства в сополимере винилиденфторид-тетрафторэтилен» представляет собой научно-квалификационную работу, которая соответствует критериям, предъявляемым к диссертациями на соискание ученой степени кандидата наук (п. 9-14 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 года № 842), и принял решение: за разработку физической модели, описывающей механизмы формирования и релаксации короноэлектретного состояния и его влияния на пьезоэлектрические свойства в сополимере винилиденфторид-тетрафторэтилен, и применение предложенной модели для описания влияния скорости предварительной ориентационной вытяжки на пьезоэлектрические и электретные свойства сополимера винилиденфторид-тетрафторэтилен, что имеет существенное значение для развития теории пьезоэлектрического состояния в полимерных материалах, присудить Сотовой Юлии Ильиничне ученую степень кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8. Физика конденсированного состояния.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 13 человек, из них – 8 докторов наук по специальности рассматриваемой диссертации, участвовавших в заседании, из 18 человек, входящих в состав совета, проголосовали: за присуждение ученой степени – 13, против присуждения ученой степени – 0, недействительных бюллетеней – 0.

Председатель

диссертационного совета

Колобов Александр Владимирович

Ученый секретарь

диссертационного совета

Яковлева Светлана Анатольевна

«19» января 2023 г.