

Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation  
Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education  
«National Research Tomsk Polytechnic University» (TPU)  
30, Lenin ave., Tomsk, 634050, Russia  
Tel. +7-3822-606333, +7-3822-701779,  
Fax +7-3822-606444, e-mail: tpu@tpu.ru, tpu.ru  
OKPO (National Classification of Enterprises and Organizations):  
02069303,  
Company Number: 027000890168,  
VAT/KPP (Code of Reason for Registration)  
7018007264/701701001, BIC 046902001

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
федеральное государственное автономное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Национальный исследовательский  
Томский политехнический университет» (ТПУ)  
Ленина, пр., д. 30, г. Томск, 634050, Россия  
тел.: +7-3822-606333, +7-3822-701779,  
факс +7-3822-606444, e-mail: tpu@tpu.ru, tpu.ru  
ОКПО 02069303, ОГРН 1027000890168,  
ИНН/КПП 7018007264/701701001, БИК 046902001

№ \_\_\_\_\_  
на № 13-18-261 от 15.03.2019



Утверждаю  
Проректор по научной работе и инновациям Национального  
исследовательского Томского политехнического университета, доктор технических наук  
Степанов И.Б.  
\_\_\_\_\_ 2019 г.

### ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

о диссертационной работе **Дюрягиной Натальи Сергеевны «Электрофизические свойства нанокomпозиционных материалов при радиационном воздействии»**, представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния.

**Актуальность темы.** Нанокomпозиционные материалы являются перспективными функциональными материалами для использования в электронике, оптотехнике. Варьируя виды включений, их размер и концентрацию можно получить материалы с принципиально новыми, нужными для конкретных приложений свойствами. Нанокomпозиционные материалы уже широко используются в технике. Круг нанокomпозиционных материалов чрезвычайно широк и продолжает расширяться. Есть потребность в разработке теоретических подходов к исследованию этих материалов, которые необходимы для развития общих представлений о процессах в них при воздействии внешних факторов. Поэтому диссертационная работа Дюрягиной Н. С., посвященная разработке физической модели описания электрофизических свойств нанокomпозиционных материалов при радиационном воздействии и исследовании этих свойств в зависимости от размера и концентрации включения является безусловно актуальной.

#### Структура и объем диссертации.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, библиографии. Полный объем диссертации 118 страниц, работа содержит 35 рисунков, 4 таблицы, список литературы, включающий 110 наименования.

#### Краткое содержание:

Во введении обозначены актуальность, научная новизна и практическая значимость диссертационной работы, а также достоверность полученных результатов и положения, выносимые на защиту.

В первой главе проведен достаточный обзор литературы по проблеме. Рассмотрены радиационные свойства, как чистых материалов, так и нанокomпозиционных материалов на их основе. Обоснован выбор материалов в качестве объекта исследования.

Обзор теоретических работ показал, что существующие модели описания свойств нанокomпозиционных материалов позволяют лишь оценить эффективные параметры нанокomпозиционных материалов. Необходимо развитие физической модели описания электрофизических свойств нанокomпозиционных материалов.

Во второй главе подробно описывается разработанная физическая модель. Прежде всего моделируется энергетический спектр локализованных состояний нанокomпозиционного материала, который учитывает состояние дефектности матрицы, наличие потенциальной ямы из-за граничных явлений между матрицей и наночастицей. Решается задача о сферической



потенциальной яме, обусловленной внедрением сферических наночастиц, и находится энергетический спектр «примесных» локализованных состояний (состояний, обусловленных включением наночастиц) в зависимости от радиуса и концентрации наночастиц. Полагая, что физическая природа захвата и термического освобождения носителей заряда одинакова для собственных и «примесных» локализованных состояний, проводится оценка коэффициента захвата и частотного фактора для «примесных» локализованных состояний.

Затем моделируется ионизация нанокomпозиционного материала, которая также учитывает как ионизацию матрицы, так и включений. Поскольку включение является центром локализованного состояния, то удаление из него электрона приводит к изменению заселенности этого состояния. Определяются скорости генерации носителей заряда за счет ионизации жесткой радиацией и при термической ионизации. Показано, что для выбранных материалов при значениях поглощенной энергии меньше  $10^3$  Дж/кг нагрев не превышает нескольких Кельвин.

Модернизирована система уравнений Роуза-Фаулера для нанокomпозиционного материала с целью учета ионизации матрицы и наночастиц. Разработан метод решения системы уравнения Роуза-Фаулера, позволяющий описывать кинетику носителей заряда в материале с произвольным спектром локализованных состояний. Ионизация нанокomпозита считается однородной по объему.

В третьей главе представлены результаты тестовых расчетов. Проверка на устойчивость решения, а также сравнение результатов с другими теоретическими и экспериментальными работами подтверждают достаточно хорошее соответствие разработанной модели реальной ситуации.

В четвертой главе приведено описание результатов экспериментальных исследований исследования радиационной проводимости и термостимулированной люминесценции чистых диэлектрических матричных материалов и нанокomпозитов на их основе, а также их анализ с позиций результатов теоретического моделирования.

#### Положения, выносимые на защиту

- 1. Физическая модель описания электрофизических свойств нанокomпозиционных материалов, основанная на рассмотрении кинетики носителей заряда в рамках модели Роуза-Фаулера с учетом ионизации включений.** *В работе приведено подробное обоснование выбранной модели, ее описание.*
- 2. Энергетический спектр и коэффициент захвата локализованных состояний, обусловленных включением сферических наночастиц в зависимости от размера.** *Рассчитанный энергетический спектр нанокomпозитного материала соответствует известным спектрам для матрицы и включений.*
- 3. Новый численно-аналитический метод решения системы уравнений Роуза-Фаулера для произвольного спектра локализованных состояний.** *Полученные результаты расчетов, их согласие с имеющейся информацией являются подтверждением защищаемого положения.*
- 4. Время релаксации проводимости к равновесному значению возрастает с увеличением концентрации мелких примесных центров, что обусловлено уменьшением скорости рекомбинации носителей заряда вследствие захвата свободных зарядов на примесные центры нанокomпозита с концентрацией «примесных» состояний, не превышающей концентрацию собственных состояний.** *Это положение соответствует существующим представлениям о зависимости времени релаксации от концентрации мелких ловушек.*
- 5. Установившееся равновесное значение радиационной проводимости нанокomпозита определяется соотношением концентраций собственных и примесных локализованных состояний, причем наибольший рост проводимости относительно его темнового значения наблюдается при облучении нанокomпозита с концентрацией «примесных» состояний, не превышающей концентрацию собственных состояний.** *Это положение подтверждается результатами прямых исследований.*



6. Внедрение в оксид алюминия наночастиц, приводящих к формированию электронных «примесных» ловушек, концентрация которых на порядок меньше концентрации «собственных» локализованных состояний, приводит к увеличению приращения интенсивности ТСЛ в зависимости от поглощенной энергии ионизирующего излучения (чувствительность) при условии предварительного нагрева до 436 К. Увеличение чувствительности обусловлено более высоким коэффициентом захвата на «примесный» уровень в сравнении с собственным. Это положение подтверждается результатами прямых исследований.

**Научная новизна.** Разработанная Дюрягиной Н.С. физическая модель для описания электрофизических свойств материалов, обобщенная для произвольного спектра локализованных состояний, может быть использована для анализа процессов в наноконпозиционных материалах.

Использование этой модели позволяет объяснять и предсказывать поведение радиационной проводимости и термостимулированной люминесценции наноконпозиционных материалов во времени. Причем рассматривается достаточно широкий временной диапазон от  $10^{-9}$  до  $10^6$  с и разные режимы воздействия ионизирующего излучения.

Следует отметить использованный Дюрягиной Н.С. подход к выбору материалов в качестве объекта исследования. Установлено, что разработанная физическая модель позволяют исследовать радиационную стойкость ПММА+CdS, и радиационную чувствительность  $Al_2O_3+SrO$ , материалов существенно различающихся своими свойствами. Это подтверждает возможность широкого использования модели для анализа процессов в широком круге наноконпозитов.

**Практическая значимость** диссертационной работы заключается в том, что в рамках предложенной модели можно предсказывать свойства наноконпозиционных материалов и определять параметры включений их размеры, форму и концентрации для получения функциональных материалов с желаемыми свойствами.

**Обоснованность и достоверность результатов.** В основу предложенной модели положено описание кинетики Роуза-Фаулера, которая является общепринятой и широко используется для интерпретации и прогнозирования обратимых процессов электрофизических свойств полимерных диэлектриков в полях ионизирующих излучений.

Представленные результаты находятся в хорошем согласии с данными, полученными с помощью других аналитических и численных методов описания радиационной проводимости чистых полимеров, а также с данными экспериментов по термостимулированной люминесценции чистого оксида алюминия. Результаты, полученные в данной работе для наноконпозиционных материалов, качественно согласуются с наблюдаемыми в экспериментах явлениями.

В качестве достоинства работы следует отметить использование при расчете на каждом временном интервале аналитических решений, что позволяет существенно повысить точность и скорость расчетов.

#### **Замечания по работе**

1. Что означает (стр. 17 а/р) «который выбирается так, чтобы минимизировать отклонение полученного аналитического решения от точного». Где и как определяется точное решение? Ошибки численного расчета определяются ошибками округления (конечное число учитываемых ЭВМ разрядов) и заменой реального изменения расчетной величины на временном расчетном интервале его линейной аппроксимацией. Поэтому выбор длины временного интервала критически важен. Имеются методы выбора временного интервала, которые обеспечивают заданную точность расчета.

2. Утверждается, что расчеты коэффициента поглощения чистого ПММА качественно согласуются с экспериментом. На рисунке видно существенное различие спектров.

3. Не объяснено качественное различие расчетных и экспериментальных результатов для коэффициента поглощения чистого ПММА в диапазоне длин волн 400÷800 нм (рис. 3.6 на стр. 66 диссертации).



4. Используется нестандартная терминология, так на стр 19 диссертации использован термин «диэлектрическая индукция» вместо устаревшего термина «электрическая индукция» и стандартного термина «электрическое смещение»

5. При расчетах не учитываются конечные размеры образцов материалов и их окружение, требующие введения в расчет граничных условий и распределений внутренних электрических полей и зарядов, но при этом проводится сравнение результатов расчета с результатами эксперимента в условиях, когда образец материала помещается за металлической мишенью, генерирующей тормозное излучение.

6. Встречаются стилистические ошибки. Например в автореферате: «Раздел 2.2 посвящен генерации носителей заряда в нанокпозиционном материале.» Вместо «Раздел 2.2 посвящен описанию результатов изучения генерации носителей заряда в...». «Облученные разной мощности и длительности нанокпозиционные материалы...» на стр 25 автореферата вместо «Облученные радиацией (или излучением) разной мощности и длительности нанокпозиционные материалы...». Слово «невозможно» (в значении утверждения чего-то) в диссертации почему-то пишется раздельно «не возможно» (стр.16 дисс.). «ни как не влияет» вместо «никак не влияет» (стр. 85 дис.), где «никак» - это наречие, усиливающее отрицание.

**Апробация результатов исследований.** Материалы диссертации опубликованы в 11 научных работах, в том числе четыре статьи в журналах, входящих в перечень рецензируемых изданий, рекомендованных ВАК и зарубежных, 1 свидетельство о регистрации программы для ЭВМ. Все положения, выносимые на защиту, достаточно полно опубликованы. Результаты работы обсуждались на 6 Конференциях, в том числе и международных. Автореферат полностью отражает содержание диссертации и опубликованных работ.

**Соответствие паспорту специальности.** Диссертационная работа соответствует паспорту специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния в пунктах: 4) теоретическое и экспериментальное исследование воздействия различных видов излучений на природу изменений физических свойств конденсированных веществ.

**Заключение.** В целом диссертация Н.С. Дюрягиной представляет собой логически завершенное научное исследование, выполненное на высоком научном уровне, в котором получена новая информация об электрофизических свойствах нанокпозиционных материалов при воздействии ионизирующего излучения. Результаты исследований, несомненно, имеют важное научное и практическое значение.

Диссертационная работа Н.С. Дюрягиной «Электрофизические свойства нанокпозиционного материала при радиационном воздействии» соответствует требованиям ВАК Министерства образования и науки РФ, предъявляемым к работам, представленным на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния, а ее автор заслуживает присуждения этой степени

Содержание работы было заслушано на научном семинаре направления «Оптехника» отделения материаловедения ИШНПТ 16 апреля 2019 г., протокол № 304.

634050, Российская Федерация, г. Томск, пр. Ленина, д. 30  
ФГАОУ ВО Национальный исследовательский Томский политехнический университет  
Тел.: +7 (382) 260-63-33. e-mail: [tpu@tpu.ru](mailto:tpu@tpu.ru); <http://tpu.ru>

Профессор отделения материаловедения ФГАОУ ВО НИ ТПУ, доктор физ.-мат. наук  
В.М.Лисицын

Номер специальности: 01.04.07 – физика конденсированного состояния

Ученое звание: профессор

Директор Испытательного центра ФГАОУ ВО НИ ТПУ, доктор технических наук

В.М. Зыков

Номер специальности: 01.04.07 – физика конденсированного состояния

Ученое звание: с.н.с.