

JOURNAL OF TRANSPORT



ISSUE 3, 2026 vol. 3

E-ISSN: 2181-2438

ISSN: 3060-5164



RESEARCH, INNOVATION, RESULTS



**TOSHKENT DAVLAT
TRANSPORT UNIVERSITETI**

Tashkent state
transport university



JOURNAL OF TRANSPORT

RESEARCH, INNOVATION, RESULTS

E-ISSN: 2181-2438

ISSN: 3060-5164

VOLUME 3, ISSUE 3

SEPTEMBER, 2026



jot.tstu.uz

TASHKENT STATE TRANSPORT UNIVERSITY

JOURNAL OF TRANSPORT

SCIENTIFIC-TECHNICAL AND SCIENTIFIC INNOVATION JOURNAL

VOLUME 3, ISSUE 3 SEPTEMBER, 2026

EDITOR-IN-CHIEF

SAID S. SHAUMAROV

Professor, Doctor of Sciences in Technics, Tashkent State Transport University

Deputy Chief Editor

Miraziz M. Talipov

Doctor of Philosophy in Technical Sciences, Tashkent State Transport University

The “**Journal of Transport**” established by Tashkent State Transport University (TSTU), is a prestigious scientific-technical and innovation-focused publication aimed at disseminating cutting-edge research and applied studies in the field of transport and related disciplines. Located at Temiryo‘lchilar Street, 1, office 465, Tashkent, Uzbekistan (100167), the journal operates as a dynamic platform for both national and international academic and professional communities. Submissions and inquiries can be directed to the editorial office via email at jot@tstu.uz.

The Journal of Transport showcases groundbreaking scientific and applied research conducted by transport-oriented universities, higher educational institutions, research centers, and institutes both within the Republic of Uzbekistan and globally. Recognized for its academic rigor, the journal is included in the prestigious list of scientific publications endorsed by the decree of the Presidium of the Higher Attestation Commission No. 353/3 dated April 6, 2024. This inclusion signifies its role as a vital repository for publishing primary scientific findings from doctoral dissertations, including Doctor of Philosophy (PhD) and Doctor of Science (DSc) candidates in the technical and economic sciences.

Published quarterly, the journal provides a broad spectrum of high-quality research articles across diverse areas, including but not limited to:

- Economics of Transport
- Transport Process Organization and Logistics
- Rolling Stock and Train Traction
- Research, Design, and Construction of Railways, Highways, and Airfields, including Technology
- Technosphere Safety
- Power Supply, Electric Rolling Stock, Automation and Telemechanics, Radio Engineering and Communications
- Technological Machinery and Equipment
- Geodesy and Geoinformatics
- Automotive Service
- Air Traffic Control and Aircraft Maintenance
- Traffic Organizatsion
- Railway and Road Operations

The journal benefits from its official recognition under Certificate No. 1150 issued by the Information and Mass Communications Agency, functioning under the Administration of the President of the Republic of Uzbekistan. With its E-ISSN 2181-2438, ISSN 3060-5164 the publication upholds international standards of quality and accessibility.

Articles are published in Uzbek, Russian, and English, ensuring a wide-reaching audience and fostering cross-cultural academic exchange. As a beacon of academic excellence, the "Journal of Transport" continues to serve as a vital conduit for knowledge dissemination, collaboration, and innovation in the transport sector and related fields.

Electrophysical properties of nanocomposite materials based on aluminium oxide

N.M. Pashaev¹, S.A. Javadov²

¹Institute of Space Research of Natural Resources, National Aerospace Agency, Baku, Azerbaijan

²Azerbaijan State University of Oil and Industry, Baku, Azerbaijan

Abstract: The paper deals with the electrophysical properties of nanocomposite materials in which aluminium oxide is used as the matrix, as well as of polymer matrices filled with nanoparticles. The aim of the work is to determine the energy spectrum of the localised states that arise when nanoparticles are embedded, as a function of their radius and concentration, and to build a theoretical model describing the electrophysical properties of a nanocomposite under ionising irradiation. It is shown that, owing to the difference in work functions, a spherical potential well is formed at the nanoparticle–matrix boundary, and its discrete levels act as impurity traps: for CdS nanoparticles in PMMA with a radius of 2 nm three hole levels of 0.52, 0.99 and 1.27 eV are formed; for a radius of 5 nm there are nine levels, seven of which are deep at 300 K; and for a radius of 10 nm there are nineteen levels, fourteen of them deep. A Rose–Fowler equation system is formulated for an arbitrary spectrum of localised states that accounts for the ionisation of both the matrix and the inclusions, and a method of its solution is proposed. Ionisation of the inclusions is shown to change the concentration of free charge carriers and the occupancy of the energy states, so the dependence of the spectrum of localised states on the radius and concentration of the nanoparticles must be taken into account when the electrophysical properties of nanocomposites are described.

Keywords: nanocomposite materials, aluminium oxide, nanoparticles, localised states, impurity traps, energy spectrum, Rose–Fowler model, radiation-induced conductivity, ionising irradiation

Электрофизические свойства нанокomпозиционных материалов на основе оксида алюминия

Пашаев Н.М.¹, Джавадов С.А.²

¹Институт космических исследований природных ресурсов Национального аэрокосмического агентства, Баку, Азербайджан

²Азербайджанский государственный университет нефти и промышленности, Баку, Азербайджан

Аннотация: В работе исследуются электрофизические свойства нанокomпозиционных материалов, в которых оксид алюминия используется в качестве матрицы, а также полимерных матриц с наночастицами. Цель работы — нахождение энергетического спектра локализованных состояний, возникающих при внедрении наночастиц, в зависимости от их радиуса и концентрации, и построение теоретической модели, описывающей электрофизические свойства нанокomпозита при воздействии ионизирующего излучения. Показано, что на границе наночастица–матрица вследствие разности работ выхода образуется сферическая потенциальная яма, дискретные уровни которой играют роль примесных ловушек: для наночастиц CdS в PMMA радиусом 2 нм образуются три дырочных уровня глубиной 0,52; 0,99 и 1,27 эВ, при радиусе 5 нм — девять уровней, из которых семь при 300 К являются глубокими, при радиусе 10 нм — девятнадцать уровней, из них четырнадцать глубоких. Сформулирована система уравнений Роуза–Фаулера для произвольного спектра локализованных состояний, учитывающая ионизацию как матрицы, так и включений, и предложен метод её решения. Установлено, что ионизация включений изменяет концентрацию свободных носителей заряда и заселённость энергетических состояний, поэтому при описании электрофизических свойств нанокomпозиционных материалов необходимо учитывать зависимость спектра локализованных состояний от радиуса и концентрации наночастиц.

^a <https://orcid.org/0009-0002-5748-8062>

^b <https://orcid.org/0009-0005-9528-6770>



Ключевые слова: нанокмпозиционные материалы, оксид алюминия, наночастицы, локализованные состояния, примесные ловушки, энергетический спектр, модель Роуза–Фаулера, радиационная электропроводность, ионизирующее излучение

1. Введение

Нано композиты – это материалы, полученные путем смешения различных функциональных материалов в матрице. Как правило, размер хотя бы одной из фаз не превышает 100 нм. В результате такого смешения можно получить нанокмпозиционные материалы, которые широко применяются в различных областях науки и техники [1].

Электрофизические свойства диэлектрических и полупроводниковых материалов определяются кинетикой носителей заряда и зависят от спектра локализованных состояний. Экспериментальные данные по изучению оптических характеристик свидетельствуют о том, что избыточный заряд, созданный ионизирующим излучением, после прекращения облучения стабилизируется на ловушках и может там оставаться длительное время.

Полимерные материалы обладают высокими физико-механическими и электроизоляционными свойствами [2, 3, 4].

Присутствуя в матрице, частицы образуют сферические агломераты, что обеспечивает сильное взаимодействие наполнителя с матрицей, а также способствует увеличению значений крутящего момента.

Использование полимеров в качестве матричного материала позволяет формировать удобные в производстве тонкие пленки. Кроме того, такие полимерные материалы, как полиметилметакрилат (PMMA), прозрачны в области ближнего ИК-видимого света [2, 4, 5], что делает его отличным матричным материалом для полупроводниковых наночастиц.

Композиты из эпоксицированного натурального каучука (ENR) и наночастиц оксида алюминия (ENRAN) были получены методом компаундирования в расплаве с последующим серным вулканизацией. Наночастицы оксида алюминия были введены в состав компаундов в количестве 10, 20, 30, 40, 50 и 60 частей на сто частей каучука (phr) для изучения влияния содержания наполнителя на характеристики вулканизации и механические свойства.

Было замечено, что частицы оксида алюминия равномерно распределены в матрице, что способствовало повышению крутящий момент минимальный МН, максимальный МЛ, модуля упругости при растяжении и твердости ENR.

Дисперсия наночастиц оксида алюминия изучалась с помощью сканирующей электронной микроскопии (SEM). Было установлено, что увеличение содержания наночастиц оксида алюминия в матрицах ENR ускоряет процесс вулканизации до 40% по сравнению с ненаполненными ENR. Минимальный крутящий момент (ML), максимальный крутящий момент (MH) и разница крутящих моментов (MH-ML) также увеличились из-за увеличения плотности сшивки в присутствии наночастиц оксида алюминия. Увеличение содержания наночастиц оксида алюминия в компаунде ENR привело к снижению прочности на разрыв, относительного удлинения при разрыве (EB) и ударной вязкости, но к увеличению твердости и модуля

упругости при растяжении по сравнению с ненаполненными ENR.

Например, в полимеры добавляли органолину [6], углеродные нанотрубки [7], наночастицы оксида алюминия [8] и наночастицы диоксида кремния [9]. Полимерные нанокмпозиции демонстрируют уникальные свойства даже при добавлении нанонаполнителей с низким содержанием наночастиц (<5 мас. %), которые невозможно получить с помощью обычных или микронаполнителей [10]. Включение нанонаполнителей улучшает механические, электрические, оптические и другие свойства полимерных композитов без существенного ущерба для таких хороших свойств, как прочность, которая жертвуется жесткостью, как это наблюдается в углеродных волокнах, наполненных резиной [11].

Для получения полимерных нанокмпозиций использовались различные полимеры, такие как эластомеры (натуральный каучук (NR), оксидированный натуральный каучук (ENR), стирол-бутадиеновый каучук (SBR), хлоропеновый каучук (CR), этиленпропилендиеновый моно мерный каучук (EPDM) и др.), термопласты (нейлон 6, 6, полипропилен (PP), полиэтилентерефталат (PET), полиметилметакрилат (PMMA), поликарбонат и др.) и полимерные смеси. Разработка полимерно-керамических нанокмпозиций создала ряд технологий и возможностей, которые могут быть применены к ENR.

Из оксида алюминия получают наночастицы [12], а также используют его в качестве матричного материала (корунд) [5]. Наночастицы оксида алюминия обычно внедряют в различные полимеры и, тем самым, улучшают его прочностные характеристики [12]. Поскольку в данной статье мы исследуем электрофизические свойства нанокмпозиционных материалов, такие как оптические и проводящие, ограничимся нанокмпозиционными материалами, в которых оксид алюминия используют в качестве матрицы.

Радиационная электропроводность и накопление объемного заряда в полимерных и керамических диэлектриках определяют работоспособность изоляции бортовой аппаратуры космических аппаратов и транспортных систем, что определяет прикладную значимость рассматриваемой задачи.

Цель – Нахождение энергетического спектра локализованных состояний при включении наночастиц в зависимости от радиуса и концентрации наночастиц.

Задача работы — построить теоретическую модель, описывающую электрофизические свойства нанокмпозиционных материалов на основе оксида алюминия и полимерных матриц при воздействии ионизирующего излучения.

2. Методика исследования

Локализованные состояния

Известно, что диэлектрические или полупроводниковые материалы имеют собственные локализованные состояния, обусловленные различными



структурными дефектами. Это могут быть нарушения ближнего или дальнего порядка, растянутые химические связи, различные инородные (на молекулярном уровне) примеси, которые приводят к изменению химического строения матрицы. Свойства локализованных состояний хорошо изучены для многих полимеров. Например, в таких полимерах, как РММА, полиэтилен высокого давления, полиэтилен низкого давления, полистирол, поликарбонат, политетрафторэтилен установлен дырочный механизм электропроводности, и спектр локализованных состояний описывается экспоненциальным распределением.

$N(E) = (N_0/kT_1) \exp(-E/kT_1)$, где N_0 — полная концентрация ловушек, T_1 — характеристическая температура распределения, энергия ловушки, E — отсчитанная от границы валентной зоны. Примером диэлектрика с электронной проводимостью является корунд $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$. Анион-дефектный оксид алюминия используется в дозиметрах, основанных на термолюминесценции [5, 13], что обусловлено наличием глубоких ловушек, которые способны хранить информацию о поглощенной дозе достаточно долгое время, пока образец не будет подвержен нагреву (термывывечивание). В отличие от полимерных диэлектриков, таких как полиметилметакрилат, где дырочные ловушки подчиняются экспоненциальному закону и имеются как мелкие ловушки, так и глубокие, в оксиде алюминия определяющую роль играют глубокие электронные ловушки, из которых термическое освобождение заряда при комнатной температуре маловероятно. В работах оксид алюминия рассматривается как диэлектрик с двумя глубокими ловушками $E_1 = 1.3$ и $E_2 = 1.6$ eV [8]. Здесь E_1 и E_2 отсчитаны от дна зоны проводимости. Захват свободных зарядов на уровень E ловушки характеризуется коэффициентом захвата $k_E = v\sigma_a(E)$, где v — скорость свободного носителя заряда, $\sigma_a(E)$ — сечение захвата на соответствующий уровень. Время термического освобождения захваченных на ловушки носителей заряда описывается выражением $\tau_E = v_0^{-1} \exp(E/kT)$, где v_0 — частотный фактор. Для ряда полимеров значения k_E , v_0 определены в работах, для оксида алюминия — в [5, 13]. Для полимеров с дырочной проводимостью характерные значения констант $k_E \sim 10^{16} \text{ m}^3/\text{s}$, $v_0 \sim 10^4\text{--}10^{11} \text{ s}^{-1}$, для оксида алюминия (электронная проводимость) — $k_E \sim 10^{20}\text{--}10^{25} \text{ m}^3/\text{s}$, $v_0 \sim 10^{13} \text{ s}^{-1}$. При включении наночастиц в запрещенной зоне образуются дополнительные локализованные состояния, на которые могут захватываться электроны и дырки, подобно тому, как примеси в полупроводниках приводят к появлению акцепторных или донорных примесных состояний. Исходя из этой аналогии локализованные состояния, обусловленные внедрением наночастиц, будем называть примесными локализованными состояниями (примесными ловушками). Найдем энергетический спектр локализованных состояний в нанокompозите со сферическими включениями, радиус которых R_{pat} . При включении наночастицы в матрицу из-за разницы уровней Ферми материалов на границе наночастица-матрица образуется сферический потенциальный барьер. Обозначим энергию Ферми и работу выхода матрицы и включения соответственно F_M , W_M , F_{pat} , W_{pat} . Если $F_M < F_{pat}$ ($W_M > W_{pat}$) электроны, стремясь к

энергетическому минимуму, перетекают из включения в матрицу. В результате включение приобретает положительный заряд $q_{pat} = C_{pat}U_0$, где C_{pat} — емкость включения, $U_0 = W_M - W_{pat}$. Электроны, удерживаемые полем положительно заряженной наночастицы, локализуются в потенциальной яме, глубина которой — U_0 относительно дна зоны проводимости матрицы. Данные включения являются включениями донорного типа. Противоположный случай, когда $F_M > F_{pat}$ ($W_M < W_{pat}$) приводит к перетеканию электронов во включение, которое в равновесном состоянии будет иметь отрицательный заряд, q_{pat} а дырки будут находиться в локализованных состояниях, энергия которых определяется относительно потолка валентной зоны матрицы. В этом случае имеем включение акцепторного типа.

Полагая, что физическая природа захвата и термического освобождения носителей заряда одинакова для собственных и примесных локализованных состояний, можно дать оценку константам K_a и m_* . Собственные локализованные состояния в различных средах обусловлены различного рода дефектами их строения. Пространственные масштабы дефектов для кристаллов составляют единицы — сотни постоянных кристаллической решетки, для полимеров — размеры макромолекул. Если в качестве оценки пространственного масштаба собственного локализованного состояния взять величину порядка 1 nm, то для включений с такими же размерами можно найти искомые константы из условия, что коэффициенты захвата и частотные факторы для собственных и примесных локализованных состояний одинаковы. Найденные таким образом константы для акцепторного включения $K_a \sim 10^{-6}$, $m_* \sim 10^2\text{--}10^9 m_e$, (m_e — масса электрона), для донорного включения $K_a \sim 10^{-9}\text{--}10^{-14}$, $m_* \sim m_e$.

Рассмотрим нанокompозит на основе РММА ($W_{PMMA} = 4.68$ eV) с включением в него наночастиц CdS ($W_{Cds} = 6.05$ eV). Данное включение является акцепторным с глубиной дырочной потенциальной ямы $U_0 = 1.37$ eV. Удобно для дальнейшего анализа выделить в спектре локализованных состояний глубокие ловушки, у которых $|E_n| > 10kT$ и, следовательно, термическое освобождение заряда при температуре T маловероятно.

При внедрении наночастиц CdS с $R_{pat} = 2$ nm в потенциальной яме образуется 3 энергетических уровня для дырок глубиной $|E_n| = 0.52, 0.99$ и 1.27 eV. При 300 K все эти уровни являются глубокими. По мере увеличения размера наночастиц растет количество энергетических уровней: для наночастиц с $R_{pat} = 5$ nm образуется 9 энергетических уровней, причем при 300 K глубокими являются 7, для $R_{pat} = 10$ nm из 19 уровней — 14 глубоких. При внедрении наночастиц SrO с работой выхода $WW_{SrO} = 2.0$ eV в $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ (работа выхода 3.05 eV) на границе наночастица-матрица образуется электронная потенциальная яма глубиной 1.05 eV, т. е. имеем примесь донорного типа. Важно отметить, что в отличие от собственных локализованных состояний энергетический спектр примесных локализованных состояний принадлежит определенной наночастице и захваченные на примесные ловушки заряды, стремясь к минимуму энергии, всегда будут занимать наиболее глубокие энергетические состояния при наличии на них вакансий. В процессе



облучения материалов спектр локализованных состояний может изменяться за счет радиационных повреждений. Учет этого фактора выходит за рамки настоящей работы, и исследования радиационной проводимости наноконпозиционных материалов рассматриваются здесь при неизменном спектре локализованных состояний.

Уравнения Роуза–Фаулера для наноконпозита и их решение

Поскольку на данном этапе нас будет интересовать только локальная электропроводность наноконпозита при облучении, полагаем, что ионизация по объему однородная, эффекты заряжения [11] не существенны и дрейфом носителей заряда можно пренебречь. Отметим, что рассмотренные здесь модель и метод ее реализации без труда обобщаются на случаи неоднородного облучения, учета заряжения и дрейфа носителей заряда, включая многомерное рассмотрение.

Обозначим через n , p концентрации свободных электронов и дырок; n_m , p_l — концентрации захваченных на ловушки электронов и дырок, где $1 \leq m \leq m_0$, $1 \leq l \leq l_0$, m_0 , l_0 — количество электронных и дырочных локализованных состояний. Пусть состояния $1 \leq m \leq \tilde{m}_0$, $1 \leq l \leq \tilde{l}_0$ относятся к локализованным состояниям матрицы наноконпозита (собственные локализованные состояния), а состояния $\tilde{m}_0 + 1 \leq m \leq m_0$, $\tilde{l}_0 + 1 \leq l \leq l_0$ относятся к примесным локализованным состояниям, которые образовались в результате внедрения наночастиц. Другие обозначения: α — коэффициент рекомбинации, $K_m = (k_m M_m - n_m)$, $K_l = k_l (L_l - p_l)$, k_m , k_l — коэффициенты захвата на электронные и дырочные ловушки, M_m , L_l — концентрации электронных и дырочных ловушек, $\tau_{m,l} = \exp(E_m)/kT / v_0$ — времена жизни зарядов на электронных и дырочных ловушках с энергией $E_{m,l}$ соответственно. Далее будем рассматривать включения одного сорта, т. е. либо донорные, когда внедренная наночастица имеет положительный заряд ($q_{pat} > 0$), либо акцепторные, когда ($q_{pat} < 0$). Система уравнений Роуза–Фаулера, описывающая динамику свободных и захваченных на ловушки зарядов, имеет вид

$$\dot{n} = S - \alpha n \left[p + \sum_{l=1}^{l_0} p_l \right] - n \sum_{m=1}^{m_0} K_m + \sum_{m=1}^{m_0} \frac{n_m}{\tau_m} + S_{pat}, \quad (1)$$

$$\dot{p} = S - \alpha p \left[n + \sum_{m=1}^{m_0} n_m \right] - p \sum_{l=1}^{l_0} K_l + \sum_{l=1}^{l_0} \frac{p_l}{\tau_l} + S_{pat}, \quad (2)$$

$$\dot{n}_m = K_m n - \frac{n_m}{\tau_m} - \alpha p n_m - \dot{S}_{pat} \delta_{m,m_0}, \quad 1 \leq m \leq m_0 \quad (3)$$

$$\dot{p}_l = K_l p - \frac{p_l}{\tau_l} - \alpha n p_l + (S_{pat} - \dot{S}_{pat}) \delta_{l,l_0+1}, \quad 1 \leq l \leq l_0, \quad (4)$$

Где $\dot{S}_{pat} = S_{pat}$ — для донорного включения, $\dot{S}_{pat} = 0$ — для акцепторного.

В начальный момент времени концентрации носителей заряда имеют равновесные (без облучения) значения n^0, p^0, n_m^0, p_l^0 . Эти значения могут быть найдены из решения системы (1)–(4) с нулевыми начальными условиями для концентраций свободных и захваченных на собственные ловушки зарядов и отсутствием вакансий на примесных ловушках при

$$S_{pat} = \dot{S}_{pat} = 0 \quad (5)$$

Феноменологическая модель Роуза–Фаулера [14] наиболее полно описывает свойства диэлектриков, учитывая перенос и удержания зарядов. В основу данного метода положена модель диэлектрика с запрещенной зоной [15].

На рис.1 представлена модель запрещенной зоны [15], где C — зона проводимости, V — валентная зона, FF — темновой уровень Ферми, AA — электронный уровень Ферми (при фотовозбуждении), BB — дырочный уровень Ферми (при возбуждении), E — мелкие электронные ловушки, H — мелкие дырочные ловушки, G — состояния, близкие к основному (рекомбинационные центры, глубокие ловушки);

1 — фотовозбуждение молекулы (дырка захватывается мелкой нейтральной ловушкой, электрон поднимается в зону проводимости и затем захватывается мелкой электронной ловушкой);

2 — термическая активация электрона с мелкой ловушки в зону проводимости с последующей рекомбинацией с дыркой на основном состоянии;

3 — термическая активация электрона в зону проводимости с последующим захватом на глубокий уровень;

4 — нейтрализация дырки, захваченной на мелкой дырочной ловушке, с электроном из валентной зоны с последующей ее рекомбинацией с электроном, захваченном на основном состоянии;

5 — мелко захваченная дырка принимает электрон из валентной зоны и затем захватывается глубокой ловушкой. Движение носителей соответствует приложенному электрическому полю.

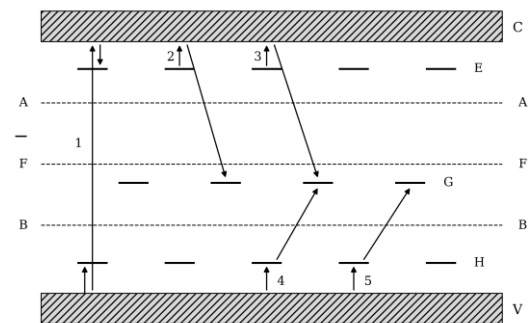


Рис. 1. Модель запрещённой зоны и акты захвата носителей заряда (построено авторами по описанию модели [15])

Суть данной модели заключается в том, что наличие примесей в кристаллической решетке и ее дефекты приводят к появлению в запрещенной зоне ряда локализованных состояний. Носители, находящиеся в любом из этих состояний, считаются связанными. Электроны на мелких уровнях или мелких ловушках находятся в тепловом равновесии с электронами из зоны проводимости.

Вероятность их переходов в эту зону в результате термического возбуждения достаточно высока.

Электроны в состояниях, близких к основному, с большей вероятностью захватывают свободные дырки и рекомбинируют с ними. Вероятность же перехода этих электронов в зону проводимости намного ниже, однако, время рекомбинации может быть весьма большим. В результате, состояния близкие к основному выступают



в качестве глубоких ловушек и центров рекомбинации.

Основное состояние является нейтральным, когда занято электроном, и положительным – будучи свободным. Такое состояние является донорным. Акцепторное состояние, наоборот, нейтрально в отсутствии электрона и отрицательно заряжено, когда занято электроном.

Электроны, с энергиями вблизи уровня Ферми, имеют приблизительно равную вероятность для возбуждения в зону проводимости и для рекомбинации. Положение уровня Ферми зависит от концентрации свободных электронов. Для дырок ситуация совершенно аналогична.

На рис.1 глубокие электронные и дырочные состояния, близкие к основным, располагаются между уровнями Ферми для электронной (АА) и дырочной (ВВ) систем.

Вызываемое облучением возбуждение приводит к генерации в материале равного числа электронов и дырок. Электроны поднимаются в зону проводимости, а затем постепенно захватываются мелкими ловушками и рекомбинируют, с дырками происходит обратное. Свободные электроны зоны проводимости и свободные дырки валентной зоны могут передвигаться под действием электрического поля, созданного в образце. Это передвижение является током проводимости. Подвижности электронов и дырок в общем случае различны. Перенос заряда может осуществляться также и другими способами, например, туннелированием электронов в зону проводимости под влиянием сильного электрического поля.

Модель Роуза-Фаулера применяется, в частности, для исследования радиационного заряжения диэлектриков [16]. Уравнения кинетики носителей заряда, основанные на данной модели, учитывают инжекцию заряда, ионизационное образование электронно-дырочных пар, их взаимную рекомбинацию, захват и освобождение носителей заряда из ловушек, дрейф носителей заряда в созданном ими электрическом поле.

В одномерном случае система уравнений модели Роуза-Фаулера имеет вид [16]:

$$\frac{\partial N}{\partial t} = S + Q_n - \frac{\partial J_N}{\partial z} - \alpha \sum_{l=1}^L N p_l \quad (6)$$

$$- \sum_{m=1}^M \frac{N}{T_m} \left(1 - \frac{n_m}{N_m}\right) + \sum_{m=1}^M \frac{n_m}{\tau_m};$$

$$\frac{\partial P}{\partial t} = S + Q_p - \frac{\partial J_P}{\partial z} - \alpha \sum_{m=1}^M P n_m - \sum_{l=1}^L \frac{P}{T_l} \left(1 - \frac{P_l}{P_l}\right) + \sum_{l=1}^L \frac{p_l}{\tau_l}; \quad (7)$$

$$\frac{\partial n_m}{\partial t} = -\alpha P n_m + \frac{N}{T_m} \left(1 - \frac{n_m}{N_m}\right) - \frac{n_m}{\tau_m}, m = 1, 2, 3, \dots; \quad (8)$$

$$\frac{\partial p_l}{\partial t} = -\alpha N p_l + \frac{P}{T_l} \left(1 - \frac{P_l}{P_l}\right) - \frac{p_l}{\tau_l}, l = 1, 2, 3, \dots; \quad (9)$$

$$p = -e[(N - P) + \left(\sum_{m=1}^M n_m - \sum_{l=1}^L p_l\right)]; \quad (10)$$

$$\frac{\partial E}{\partial z} = \frac{\rho}{\epsilon \epsilon_0}. \quad (11)$$

Здесь m и l – индексы отрицательных и положительных ловушек соответственно, $N(z, t)$ и $P(z, t)$ – плотности свободных отрицательных и положительных ловушек, n_m и p_l – концентрации захваченных носителей зарядов на ловушках, $N(z, t)$ – концентрация отрицательных ловушек m -того сорта, где $m=1, 2, \dots, M$, $P_l(z, t)$ – концентрация положительных ловушек l -того сорта, где $l=1, 2, \dots, L$, τ_m – время жизни отрицательного заряда в ловушках m -сорта, t_l – время жизни положительного заряда в ловушках l -того сорта, T_m и T_l – время захвата отрицательного и положительного зарядов на ловушку,

$\alpha = \mu_{\pm} - \mu_{-} e / \epsilon \epsilon_0$ – коэффициент рекомбинации, где $\mu_{\pm}$ и μ_{-} – подвижности дырок и электронов, ϵ – диэлектрическая проницаемость, а ϵ_0 – электрическая постоянная, S – скорость генерации электронно-дырочных пар вследствие ионизации среды, Q_N и Q_P – скорости генерации электронов и дырок за счет термоионизации, $J_N = -\mu_{-} N E$ и $J_P = \mu_{+} P E$ – токи, обусловленные движением электронов и дырок, $E = \partial \phi / \partial z$ – напряженность электрического поля, ϕ – потенциал, ρ – плотность заряда.

В нанокomпозиционных материалах включение наночастиц приводит к появлению энергетических уровней в запрещенной зоне, аналогично тому, как наличие примесей в диэлектриках приводят к примесной проводимости. Таким образом, зная спектры состояния, обусловленные включениями наночастиц, модель Роуза-Фаулера вполне можно применить к описанию оптических свойств нанокomпозиционных материалов. Однако, чтобы использовать модель Роуза-Фаулера для описания оптических свойств нанокomпозиционного материала, необходимо эту модель модифицировать. А именно задать концентрацию локализованных состояний, обусловленных включениями. Внедрение частиц в матричный материал сопровождается различными контактными и поверхностными явлениями на границе включение-матрица, поэтому необходимо учесть эти явления [14].

3. Заключение

Исследование Разработан новый метод решения системы уравнений Роуза-Фаулера для произвольного спектра локализованных состояний. Тестовые расчеты продемонстрировали эффективность данного метода. Найден энергетический спектр примесных локализованных состояний в нанокomпозите со сферической наночастицей в зависимости от ее размера.

Предложенная модель ионизации нанокomпозита учитывает как ионизацию матрицы, так и ионизацию включений. Показано, что ионизация включений меняет концентрацию свободных носителей заряда и заселенность энергетических состояний.



Электрофизических свойств нанокomпозиционных материалов необходимо учесть зависимость энергетического спектра локализованных состояний от радиуса и концентрации наночастиц. Модели описания оптических свойств нанокomпозиционных материалов учитывают поляризационные эффекты и позволяют определить различные параметры нанокomпозиционного материала, такие как показатель преломления, диэлектрическая проницаемость и коэффициент пропускания. Однако данные модели не учитывают кинетику носителей заряда и не позволяют описать явления, в которых кинетика носителей заряда является определяющим фактором.

Таким образом, необходимо разработать теоретическую модель на основе системы уравнений Роуза-Фаулера для описания электрофизических свойств нанокomпозиционного материала при воздействии ионизирующего излучения.

Использованная литература / References

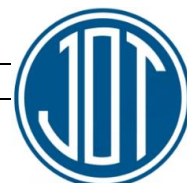
- [1] Головань Л. А., Тимошенко В. Ю., Кашкаров П. К. Оптические свойства нанокomпозитов на основе пористых систем // Успехи физических наук. 2007. Т. 177, № 6. С. 619–638.
- [2] Anthony J. K., Kim H. Ch., Lee H. W., Mahapatra S. K., Lee H. M., Kim Ch. K., Kim K., Lim H., Rotermund F. Particle size-dependent giant nonlinear absorption in nanostructured Ni–Ti alloys // Optics Express. 2008. Vol. 16, Iss. 15. P. 11193–11202. <https://doi.org/10.1364/OE.16.011193>
- [3] Shamilov R. R., Galyametdinov Yu. G. Polymethylmethacrylate nanocomposites based on quantum dots of CdSe and CdSe/CdS synthesized in a water-ethanol medium // Bulletin of the Kazan Technological University. 2013. Vol. 16, Iss. 15. P. 322–324.
- [4] Popov V. K., Bagratashvili V. N., Krotova L. I., Rybaltovskii A. O., Smith D. C., Timashev P. S., Yang J., Zavorotnyi Yu. S., Howdle S. M. A route to diffusion embedding of CdSe/CdS quantum dots in fluoropolymer microparticles // Green Chemistry. 2011. Vol. 13, Iss. 10. P. 2696–2700. <https://doi.org/10.1039/c1gc15553a>
- [5] Кортвов В. С., Мильман И. И., Никифоров С. В. Твердотельная дозиметрия // Известия Томского политехнического университета. 2000. Т. 303. С. 35–45.
- [6] Teh P. L., Mohd Ishak Z. A., Hashim A. S., Karger-Kocsis J., Ishiaku U. S. Effects of epoxidized natural rubber as a compatibilizer in melt compounded natural rubber–organoclay nanocomposites // European Polymer Journal. 2004. Vol. 40, Iss. 11. P. 2513–2521.
- [7] Shanmugharaj A. M., Bae J. H., Lee K. Y., Noh W. H., Lee S. H., Ryu S. H. Physical and chemical characteristics of multiwalled carbon nanotubes functionalized with aminosilane and its influence on the properties of natural rubber composites // Composites Science and Technology. 2007. Vol. 67. P. 1813–1822.
- [8] Siegel R. W., Chang S. K., Ash B. J., Stone J., Ajayan P. M., Doremus R. W., Schadler L. S. Mechanical

behavior of polymer and ceramic matrix nanocomposites // Scripta Materialia. 2001. Vol. 44. P. 2061–2064.

- [9] Park S. J., Jin S. Y., Kaang S. Influence of thermal treatment of nano-scaled silica on interfacial adhesion properties of the silica/rubber compounding // Materials Science and Engineering A. 2005. Vol. 398. P. 137–141.
- [10] López-Manchado M. A., Valentín J. L., Carretero J., Barroso F., Arroyo M. Rubber network in elastomer nanocomposites // European Polymer Journal. 2007. Vol. 43, Iss. 10. P. 4143–4150. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2007.07.023>
- [11] Ajayan P. M., Schadler L. S., Braun P. V. Nanocomposite Science and Technology. Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2003.
- [12] Mohamad N., Muchtar A., Jameelah M., Dahlan Gh., Mohd Hj., Azhari Ch. H. The effect of filler on epoxidized natural rubber-alumina nanoparticles composites // European Journal of Scientific Research. 2008. Vol. 24, Iss. 4. P. 538–547.
- [13] Никифоров С. В., Кортвов В. С. // Физика твёрдого тела. 2014. Т. 56, вып. 10. С. 1999–2003.
- [14] Орешкин П. Т. Физика полупроводников и диэлектриков. М.: Высшая школа, 1977. 448 с.
- [15] Электреты / под ред. Г. Сесслера. М.: Мир, 1983. 486 с.
- [16] Ванников А. В., Матвеев В. К., Сичкарь В. К., Тютнев А. П. Радиационные эффекты в полимерах. Электрические свойства. М.: Наука, 1982.

Информация об авторах/ Information about the authors

Пашаев Н.М. / Namik Pashayev	Институт космических исследований природных ресурсов Национального аэрокосмического агентства, главный научный сотрудник, доктор философии по технике (PhD) E-mail: namikpasha@rambler.ru Тел.: +994 55 333 14 27 https://orcid.org/0009-0002-5748-8062
Джавадов С.А. / Sohrab Javadov	Азербайджанский государственный университет нефти и промышленности; докторант Института космических исследований природных ресурсов Национального аэрокосмического агентства E-mail: sohrabcavadov2@gmail.com Тел.: +994 10 312 13 07 https://orcid.org/0009-0005-9528-6770



A. Martazaev, S. Razzakov*Distribution of glass fibers in the concrete matrix.....177***D. Bekmirzaev, A. Sodikov***Stochastic modelling of post-earthquake evacuation risk in a student dormitory with a failed exit element.....182***N. Pashaev, S. Javadov***Electrophysical properties of nanocomposite materials based on aluminium oxide.....188***U. Khamrokulov***Scaling of precast-monolithic reinforced concrete frame building models, test program and selection of materials.....194*