



## Article

# Электрические свойства органических полупроводников на основе полиакрилонитрила

Д. Саидкулов<sup>1</sup>, М.Карабаева<sup>1</sup>, Я.М. Рахимова<sup>1\*</sup>, Ш. Камилов<sup>1</sup>, У. Абдурахманов<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Национальный университет Узбекистана имени Мирзо Улугбека, Ташкент, 100174, Узбекистан  
dostonsaidkulov@gmail.com (Д.С.), mkabdullaevna@gmail.com (М.К.), yayra@yandex.ru (Я.Р.),  
sherkamilov19@gmail.com (Ш.К.), abdurakhmanovu@yahoo.com (У.А.)

\* Correspondence: dostonsaidkulov@gmail.com; Tel.: +998 90 3351494 (Д.С.)

**Аннотация:** Проводимость и статическая диэлектрическая проницаемость термообработанных продуктов полиакрилонитрила с областями полисопряжения измерены в окрестности перколяционного порога. Найдено, что ниже этого порога экспериментально полученные зависимости проводимости и статической диэлектрической проницаемости от объемного содержания областей полисопряжения в этих материалах отличаются от зависимостей, рассчитанных в рамках перколяционной теории. Происхождение этого несоответствия обсуждается в понятиях пространственно-структурной иерархической модели, предложенной Balberg и др. для композитных материалов. Анализ температурной зависимости проводимости в рамках локальной энергии активации проводимости в них, показывает образование непрерывной пространственной структуры из туннельно-связанных областей полисопряжения.

**Ключевые слова:** полупроводниковый термообработанный полиакрилонитрил, область полисопряжения, электропроводность, диэлектрическая проницаемость, локальная энергия активации.

## Electrical properties of organic semiconductors based on polyacrylonitrile

D.Saidkulov<sup>1</sup>, M.Karabayeva<sup>1</sup>, Y. Raximova<sup>1\*</sup>, Sh.Kamilov<sup>1</sup>, U.Abduraxmanov<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Mirzo Ulugbek National University of Uzbekistan, Tashkent, 100174, Uzbekistan  
dostonsaidkulov@gmail.com (D.S.), mkabdullaevna@gmail.com (M.K.), yayra@yandex.ru (Y.R.), sherkamilov19@gmail.com (Sh.K.),  
abdurakhmanovu@yahoo.com (U.A.)

**Цитирование:** Д.Саидкулов,  
М.Карабаева, Я. Рахимова, Ш.Камилов,  
У.Абдурахманов. Электрические  
свойства органических  
полупроводников на основе  
полиакрилонитрила. 2024, 1, 1, 3.  
<https://doi.org/>

Полученный: 10.11.2024  
Исправленный: 18.11.2024  
Принято: 25.11.2024  
Опубликованный: 30.11.2024

**Copyright:** © 2024 by the authors.  
Submitted to for possible open access  
publication under the terms and  
conditions of the Creative Commons  
Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

### Abstract:

Conductivity and static permittivity of heat-treated polyacrylonitrile products with polyconjugation regions are measured in the vicinity of the percolation threshold. It is found that below this threshold, the experimentally obtained dependences of conductivity and static permittivity on the volume content of polyconjugation regions in these materials differ from the dependences calculated within the percolation theory. The origin of this discrepancy is discussed in terms of the spatial-structural hierarchical model proposed by Balberg et al. for composite materials. Analysis of the temperature dependence of conductivity within the local activation energy of conductivity in them shows the formation of a continuous spatial structure of tunnel-connected polyconjugation regions.

**Keywords:** Semiconductor heat-treated polyacrylonitrile, polyconjugation region, electrical conductivity, permittivity, local activation energy.

### Введение

В последние годы особый интерес, как с фундаментальной, так и с прикладной точки зрения представляют неупорядоченные системы, содержащие проводящие волокнистые напол-

нителю (нанотрубки, нановолокна, нанопроволки и т.д.). К примеру недавно опубликованной обзорной статье И.Балберга [1] показана, что существующие классические теории перколяции, сплошной перколяции и теории эффективной среды могут объяснить все особенности зависимости электропроводности от содержания волокнистого наполнителя в таких системах, а также приведены ряд областей их практического применения. С другой стороны полупроводниковые материалы с цепочечной структурой (органические полупроводники на основе легированных сопряженных полимеров, молекулярно допированные полимеры, полимерные композиты с включениями углеродных нанотрубок, термообработанные продукты ряда полимеров с областями полисопряжения и т.д.) также представляют интерес. [2,4]. Нами показано [5,6][5,6], что формирования термообработанных продуктов ряда полимеров (пирополимеры) в том числе полиакрилонитрил в первом приближении можно представить в виде процесса наполнения диэлектрика волокнистыми нанодисперсными проводящими частицами – областями полисопряжения. Поэтому композиты, содержащие проводящие волокнистые наполнители, а также полупроводниковые материалы с цепочечной структурой в том числе термообработанные продукты полиакрилонитрила могут быть включены в один общий класс неоднородных систем. В отличие от композитов, содержащих проводящие волокнистые наполнители в пирополимерах хорошо электропроводящие области полисопряжения возникают под действием термообработки в результате сложных химических превращений и находятся в химически связанном состоянии с непроводящими участками.

Поэтому, выяснение механизма переноса носителей заряда в органических проводящих пирополимерах в рамках современных теорий неоднородных систем вновь приобрела актуальность.

### Материалы и методы

В качестве объекта исследования использовали термообработанный порошкообразный (диаметр зерен порядка 0,5–1 мкм) полиакрилонитрил (ПАН). Термообработку образцов проводили в вакууме в интервале температур 200°–1100° С в течение трех часов при каждой температуре с интервалом 50° С. Проводимость при постоянном и переменном полях измеряли под давлением порядка 0,35 ГПа в камере фиксированного давления [7], в вакууме порядка 10<sup>-3</sup> мм рт. ст. Это позволило, исключив контактные явления между частицами порошка, изучать свойства монолитного соединения. Проводимость была определена измерением сопротивления, а диэлектрическая проницаемость была рассчитана путем измерения емкости образцов. Методики измерения сопротивления и ёмкости образцов подробно описаны в работе [8]. Определение объемной доли областей полисопряжения описана в работе [5]. Размер длины полисопряжения определен методом малоугловой рентгеновской дифракции, который был использован нами для других композитных материалов, содержащих наночастицы никеля [9].

В работах [5,6] показано, что пирополимеры, типичными представителями которых являются термообработанные продукты ПАН, при низких температурах термообработки ( $T_t \leq 200^\circ\text{C}$ ) являются диэлектриками, а при  $T_t \geq 200^\circ\text{C}$  приобретают полупроводниковые свойства. Ответственными за электрические свойства полупроводникового ПАН являются области полисопряжения, появляющиеся при  $T_t \geq 200^\circ\text{C}$ . Они представляют собой более плотные по сравнению с классическим полимером уплощенные нановольтовых линейным размером  $\leq 10$  нм, а их диаметр сечения оценивается порядка 0,5 нм, в которых носителем заряда являются  $\pi$ -электроны двойных связей, подобно как в органических проводящих полимерах, к примеру, полиантрацен или полиацетилен. Менее плотные и потому более широкозонные промежутки между областями сопряжения представляют собой потенциальные барьеры для электронов.

Целью данной работы является исследование зависимости поведения проводимости и статической диэлектрической проницаемости от объемного содержания областей полисопряжения в пирополимерах на основе ПАН в рамках современной теории неупорядоченных систем [1,11], а также анализ полученных результатов по исследованию температурной зависимости проводимости в рамках локальной энергии активации проводимости, для выяснения механизма переноса носителей заряда в них.

### Результаты

Термообработанный продукт ПАН, при  $200^\circ \leq T_t \leq 600^\circ\text{C}$ , когда объем областей полисопряжения увеличивается (рис. 1) за счет увеличения их количества, полупроводниковый ПАН представляет собой электронно-неоднородную систему. При  $T_t \geq 600^\circ\text{C}$  происходит рост и объединение областей сопряжения, в результате чего пирополимер представляет собой уже однофазную систему, образованную бесконечным кластером из областей полисопряжения [5].

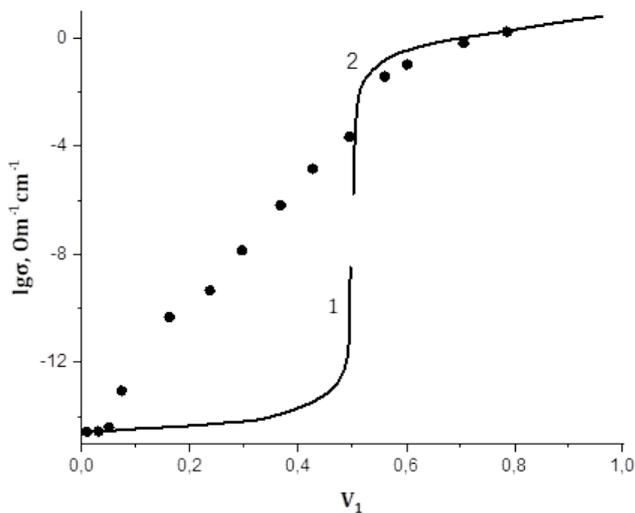
Согласно перколяционной теории проводимости  $\sigma$  систем, содержащих металлические частицы, распределенных случайным образом в диэлектрической матрице, используя граничные условия ( $V_1 = 0$  и  $V_2 = 1$ ), описывается следующими формулами:

$$\sigma(V_1) = \sigma_2(V_c - V_1/V_c)^q \quad \text{при } V_1 < V_c, \tag{1}$$

$$\sigma(V_1) = \sigma_1(V_1 - V_c/1 - V_c)^t \quad \text{при } V_1 \geq V_c. \tag{2}$$

здесь  $\sigma_1$  — проводимость металлических частиц;  $\sigma_2$  — проводимость диэлектрической матрицы;  $V_c$  — критическая концентрация (порог протекания), при которой впервые образуется бесконечный кластер (БК) из частиц наполнителя;  $t$  и  $q$  — параметры, называемые критическими индексами.

Для изучаемых пирополимеров  $V_c$  была определена при помощи дифференцирования  $\log \sigma$  по  $V$ . Критический индекс  $t$  был получен из экспериментальных данных, представляя их как график в координатах  $\log - \log[(V_1 - V_c)/(1 - V_c)]$ , угол наклона графика, есть  $t$ . Величина  $\sigma_1$  была получена экстраполяцией этого графика к  $V_1 = 1$ . Найдено, что  $V_c = 0,50$  (при  $T_t = 600^\circ\text{C}$ ) и  $t = 2,20$ .



**Рис. 1.** Сравнение экспериментальных (точки) и расчетных (сплошные кривые) величин проводимости как функции объемного содержания нановолокнистыми «проводящими» частицами – областями полисопряжения ( $V_1$ ). 1 –  $\sigma_{\text{рас}}$  по (1), 2 –  $\sigma_{\text{рас}}$  по (2).

**Fig.1.** Comparison of experimental (points) and calculated (solid curves) values of conductivity as a function of the volumetric content of nanofibrous "conducting" particles – regions of polyconjugation ( $V_1$ ). 1 –  $\sigma_{\text{calc}}$  according to (1), 2 –  $\sigma_{\text{calc}}$  according to (2).

Как видно из рис. 1 для изучаемых пирополимеров соответствие между расчетными и экспериментальными данными наблюдается при  $V_1 > V_c$ . Следовательно для полученных пирополимеров значение  $V_c$  намного больше, чем теоретическое значение порога протекания

[1], но близка для керамических материалов с высокодисперсными частицами никеля  $V_c = 0,443$  [8].

Существование порога при большой концентрации, чем предсказываемой теорией протекания в пирополимерах, говорит, как показано и в [? ?], о высокой степени асимметрии между характерными формами проводящих и непроводящих областей.

Отклонение экспериментальной зависимости электропроводности пирополимеров показывает, что в них имеется дополнительный вклад в электропроводности ниже  $V_c$ . Эти результаты могут быть поняты на основе предложенной Бальбергом модели электрической проводимости в композитах [11].

Согласно этой модели, все металлические частицы в композитах, в которых металлические частицы случайным образом распределены в диэлектрической матрице, являются электрически связанными, и проводимость этих композитов определяется как туннелированием носителей заряда между соседними частицами, так и туннелированием между частицами, находящимися на удалении. Перколяционное поведение наблюдается, когда вклад туннелирования между частицами, удаленными друг от друга в макроскопическую проводимость, является пренебрежимо малым. Это имеет место, когда радиус частиц ( $b$ ) значительно превосходит параметр области туннелирования (или параметра распада туннелирования) ( $d$ ). В том случае, когда  $b \sim d$ , туннелирование носителей заряда между не соседними частицами вносит вклад в макроскопическую проводимость наряду с туннелированием между соседними частицами и зависимость макроскопической проводимости от концентрации металлосодержащих частиц отличается от той, которая диктуется классической перколяционной теорией. Можно видеть, что описанное выше поведение проводимости изучаемых пирополимеров согласуется с этими модельными предсказаниями.

Как показано в [11], в таких композитах существуют два перколяционных порога, один из них наблюдается при высоких значениях  $V_1$ , и он есть определенный выше перколяционный порог  $V_c$ . Другой из них (дополнительный перколяционный порог  $V_{cd}$ ) наблюдается при низких значениях  $V_1$  и он есть критический долевым объем металлических частиц который инициирует первый бесконечный кластер из туннельно-связанных проводников. Осуществляя подгонку участка (для  $V_1 < V_c$ ) экспериментальной кривой 1 (рис. 1) для пирополимера установили, что  $V_{cd} = 0,05$ .

На рис. 2 показаны экспериментальные и теоретические зависимости статической диэлектрической проницаемости  $\varepsilon$  от  $V_1$  для изучаемых материалов. Статическая диэлектрическая проницаемость была рассчитана на низких частотах изменяя диэлектрическую проницаемость в области 20–200 Гц путем экстраполяции этой зависимости к нулевой частоте.

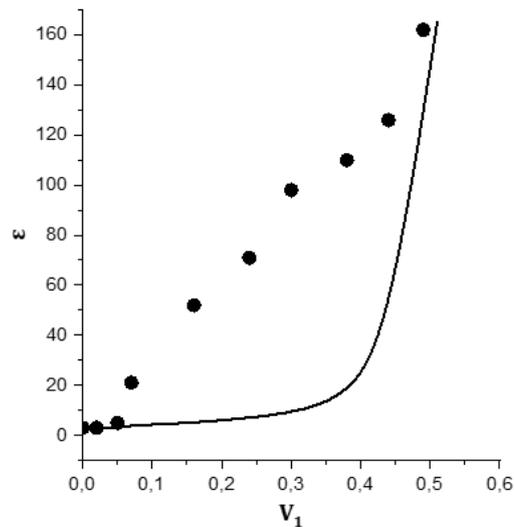
Теоретические зависимости рассчитаны по следующей формуле:

$$\varepsilon(V_1) = \varepsilon_d \left( \frac{V_c - V_1}{V_c} \right)^{-q}, \quad V_1 < V_c, \quad (3)$$

где  $\varepsilon$  — диэлектрическая проницаемость ПАН, индекс  $q$  тот же как в (1). Эта формула, используя граничное условие  $V_1 = 0$ , была изучена из выражения для статической диэлектрической проницаемости вблизи перколяционного порога, которое имеет вид [?].

$$\varepsilon(V_1) = \frac{\varepsilon_d}{|V_1 - V_c|^q}, \quad \omega = 0 \quad (4)$$

Расчет был выполнен с теми же самыми значениями  $V_c$ , которые были получены из экспериментальных зависимостей  $\sigma$  от  $V_1$ , как описано выше.



**Рис. 2.** Сравнение экспериментальных (*точки*) и расчетной (*сплошной кривой*) величины статической диэлектрической как функции объемного содержания нановолокнистыми «проводящими» частицами – областями полисопряжения ( $V_1$ ).  $1 - \epsilon_{\text{рас}}$  по (4).

**Fig.2.** Comparison of the experimental (*points*) and calculated (*solid curve*) values of the static dielectric constant as a function of the volumetric content of nanofibrous "conducting" particles – regions of polyconjugation ( $V_1$ ).  $1 - \epsilon_{\text{calc}}$  according to (4).

Как видно из рис. 2 для пирополимеров экспериментальная зависимость  $\epsilon$  от  $V_1$  не согласуется с зависимостью, рассчитанной по этой формуле и показывает дополнительный вклад в  $\epsilon$ . Примечательно, что для этого пирополимера кривая  $V_1$  — зависимость для  $\epsilon$  подобна кривой  $V_1$ -зависимости для  $\sigma$ .

Основываясь на качественной интерпретации резкого увеличения  $\epsilon$  вблизи перколяционного порога [13] и физических представлениях об «иерархии» электрически связанных пространственных структур в композитах [11], принимая во внимание, что для соответствующих композитных материалов, изучаемых здесь, кривые  $V_1$ -зависимости для  $\epsilon$  и  $\sigma$  подобны, можно предложить следующие интерпретации поведения  $\epsilon$ .

В изучаемых пирополимерах при увеличении  $V_1$  образуются кластеры из областей полисопряжения, которые разделены диэлектрическим материалом матрицы. Каждая пара этих кластеров образует конденсатор. В нашем случае присутствие характерной особенности на  $V_1$ -зависимости для  $\epsilon$  при рассмотренном выше дополнительном перколяционном пороге  $V_{cd}$  позволяет сделать вывод, что конденсаторы, включающие не ближайшие кластеры, вносят вклад в макроскопическую емкость наряду с конденсаторами, включающими ближайшие кластеры. Изменение хода кривой зависимости  $\epsilon$  от  $V_1$  для этого композита в области  $V_{cd}$  может быть принято в качестве свидетельства начала процесса образования непрерывной пространственной структуры из туннельно-связанных проводников.

Для выяснения образования непрерывной пространственной структуры из туннельно-связанных проводников в пирополимерах нами были исследованы их температурные зависимости проводимости.

Известно, что относительно низкотемпературный ( $T \leq 450$  K) электронперенос в полупроводниковом ПАН осуществляется путем моттовской прыжковой проводимости с переменной длиной прыжка (Variable range hopping, VRH) [14].

$$\sigma = \sigma_0 \exp[-(T_0/T)^x], \quad (5)$$

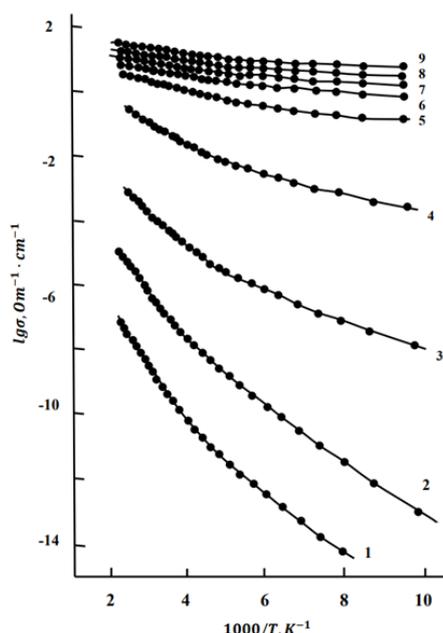
где численное значение показателя  $x \approx 0.25$  подтверждалось в [5] методом спрямления в заранее выбранных координатах  $\log \sigma - T^{-1/4}$ . Однако выполненный нами анализ по данным этих работ показывает, что с не меньшей точностью возможно спрямление и в других масштабах. Поэтому возникает вопрос о точном определении показателя  $x$  в (5), а в конечном счете

и энергетического хода плотности локализованных состояний  $g(\epsilon) = g_0(\epsilon - \epsilon_F)^n$  вблизи энергии Ферми  $\epsilon_F$ , поскольку имеет место связь  $x = n + 1/n + d + 1$ , где  $d$ -размерность пространства.

Результаты измерений  $\sigma(T)$  для серии образцов ПАН приведены на рис. 3. Для определения  $x$  в уравнении (5) в пирополимерах использован метод анализа температурной зависимости приведенной энергии активации проводимости. Этот метод обработки нами было использован для исследования температурной зависимости проводимости композитов, керамических и полимерных материалов, содержащих наночастицы никеля [15,16].

$$\begin{aligned} \lg \omega &= B - \chi \lg T, \\ \omega &= -\frac{1}{T} \frac{\partial \lg \sigma}{\partial T^{-1}} = \frac{\partial \lg \sigma}{\partial \lg T}. \end{aligned} \tag{6}$$

где  $B = \text{const}$ ,  $\omega$  — приведенная энергия активации проводимости.



**Рис. 3.** Электропроводность пиро-ПАН, термообработанных при  $T$ , °C: 1-350, 2-450, 3-550, 4-650, 5-750, 6-850, 7-900, 8-1000, 9-1100.

**Fig.3.** Electrical conductivity of pyro-PAN, thermally treated at  $T$ , °C: 1-350, 2-450, 3-550, 4-650, 5-750, 6-850, 7-900, 8-1000, 9-1100.

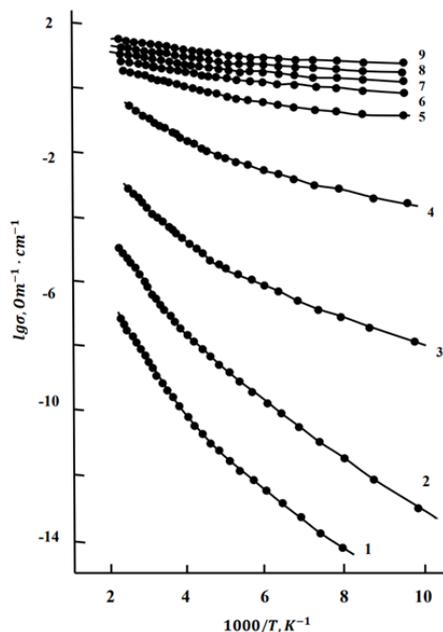
На рис. 4 приведена температурная зависимость  $\omega$  для образцов, полученная графическим дифференцированием кривых рис. 3 в координатах  $\lg \sigma - \lg T$ .

Видно, что имеется три характерных области: высоко- и низкотемпературная, разделенные переходной областью. В высокотемпературной области справа от кривой  $a$ , на рис. 4  $\lg \omega - \lg T$ , что соответствует  $x = 1$  в (5), т.е. проводимости с постоянной энергией активации  $\Delta\epsilon$ .

$$\sigma = \sigma_0 \exp\left(\frac{\Delta\epsilon}{kT}\right), \tag{7}$$

При сравнительно низких температурах (слева от кривой  $c$ )  $\lg \omega - x \lg T$  с  $x \approx 0.5$ . Это соответствует частному случаю закона (1) для проводимости с переменной энергией активации (рис. 4)

$$\sigma = \sigma'_0 \exp\left[-\left(\frac{T_0}{T}\right)^{1/2}\right], \tag{8}$$



**Рис. 4.** . Зависимость приведенной энергии активации пиро-ПАН от температуры. Обозначения, как на рис. 2.

**Fig.4.** Dependence of the reduced activation energy of pyro-PAN on temperature. Notations as in Fig. 2.

#### Обсуждение:

Анализ температурной зависимости электропроводности в рамках локальной энергии активации проводимости показывает, что в полупроводниковых пирополимерах на основе полиакрилонитрила в области ниже классического перколяционного порога протекания, в высокотемпературной области основной вклад в электропроводности дают туннелирование носителей заряда между ближайше-соседними так и не ближайше-соседними областями полисопряжения с постоянной энергией активации проводимости. При сравнительно низких температурах также электроперенос в таких системах осуществляется туннелированием носителей заряда между ближайше-соседними так и не ближайше-соседними областями полисопряжения, но характеризуется так называемой «скользящей» энергией активации, т. е. длина прыжка ( $r$ ) увеличивается с уменьшением температуры по закону  $r \sim T^{-1/2}$  [17]. В переходной области оба эти механизмы проводимости плавно переходят из одного к другому.

#### Заключение

Проводимости  $\sigma$  и статическая диэлектрическая проницаемость  $\epsilon$  от долевого содержания областей полисопряжения  $V$  термообработанных продуктов полиакрилонитрила измерены в окрестности перколяционного порога. Установлено, что ниже этого порога экспериментально полученные зависимости проводимости и статической диэлектрической проницаемости от объемного содержания областей полисопряжения в этих материалах отличаются от зависимостей, рассчитанных в рамках перколяционной теории, с тем фактом, что кривая этой зависимости для  $\epsilon$  подобна кривой для  $\sigma$ . Сделан вывод, что в изучаемых пирополимерах перколяционно-туннельный процесс, который рассматривается (Valberg и др.) как причина (низкого) перколяционного порога  $V_d$  и определяет поведение  $\sigma$  в области ниже классического перколяционного порога, также определяет поведение  $\epsilon$  в этой области. На основе анализа температурной зависимости проводимости в них в рамках локальной энергии активации проводимости, подтверждено образование непервичной пространственной структуры из туннельно-связанных областей полисопряжения.

#### Вклад авторов.

Концептуализация, Ш.К. и У.А.; методология, Я.Р.; программное обеспечение, Д.С.; формальный анализ, М.Карабаева; исследование, Д.С.; написание и редактирование, Ш.К.

и У.А.; руководство, У.А. Все авторы ознакомлены с опубликованной версией рукописи и согласны с ней.

#### **Authors' contribution.**

Conceptualization, S.K. and U.A.; methodology, Y.R.; software, D.S.; formal analysis, M.Karabayeva; research, D.S.; writing and editing, S.K. and U.A.; guidance, U.A. All authors are familiar with the published version of the manuscript and agree with it.

#### **Источник финансирования.**

Это исследование не получало внешнего финансирования.

#### **Funding source.**

This research received no external funding.

#### **Соответствие принципам этики.**

Это исследование не требовало этического одобрения.

#### **Ethics approval.**

This study did not require ethical approval.

#### **Информированное согласие на публикацию.**

Информированное согласие было получено от всех участников исследования.

#### **Consent for publication.**

Informed consent was obtained from all subjects involved in the study.

#### **Заявление о доступности данных**

Информация, представленная в данной статье, является результатом работы авторов и заинтересованные лица могут обратиться по вышеуказанным адресам электронной почты для получения информации по данной теме.

#### **Data Availability Statement**

The information presented in this article is the product of the authors' work, and those interested can contact the above-mentioned e-mail addresses regarding the information on the topic.

#### **Благодарности**

Выражаем благодарность доктору Исаак Балбергу за помощь в подготовке статьи.

#### **Acknowledgments**

We express our gratitude to Dr. Isaac Balberg for his assistance in preparing the article.

#### **Конфликт интересов**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

#### **Conflict of interest**

The authors declare no conflicts of interest.

#### **Сокращения**

ПАН полиакрилонитрил  
VRH Variable range hopping

#### **Литература**

- [1] Balberg I., The physical fundamentals of the electrical conductivity in nanotube-based composites, Journal of Applied Physics, 2020, 128.
- [2] Khan Asif Ali, Ahmad Rais, Zeeshan Mohd., Comparative sensing of aldehyde and ammonia vapours on synthetic polypyrrole-Sn (IV) arsenotungstate nanocomposite cation exchange material, Analytical Chemistry Research, 2017, 12, 52–64.
- [3] Kalbaev S.E., Rakhimberdiyeva M.K., Kattaev N.T., Akbarov Kh.I., Kamilov Sh., Saidkulov D.R., Abdurakhmanov U., Study of electrical conductivity of "cellulose-polypyrrole" composites, Reports of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan, 2023, 05, 45–49, In Russian: Калбаев С.Е., Рахимбердиева М.К., Каттаев Н.Т., Акбаров Х.И., Камиллов Ш., Саидкулов Д.Р., Абдурахманов У.

- Исследование электропроводности композитов «целлюлоза – полипиррол». Доклады Академии наук Республики Узбекистан (ДАН) № 5, 2023 г., Стр. 45–49.
- [4] Venediktov V.A., Zvyagin I.P., Influence of orientational disorder on hopping conductivity of organic disordered semiconductors, Vestnik Moskovskogo Universiteta. Seriya 3. Fizika. Astronomiya, 2011, 06, 89–92, In Russian: Венедиктов В.А., Звягин И.П. Влияние ориентационного беспорядка на прыжковую проводимость органических неупорядоченных полупроводников. ВМУ. Серия 3. ФИЗИКА. АСТРОНОМИЯ. 2011. №6, с.89–92.
- [5] Magrupov M.A., Russian Journal of Chemistry (Uspekhi Khimii), 1981, 50, 011, 2106–2131, In Russian: Магруппов М.А. Успехи химии, 1981, т.50, №11, с.2106–2131.
- [6] Magrupov M.A., Abdurakhmanov U., Vysokomolekulyarnye Soedineniya (High Molecular Compounds), 1980, 22A, 010, 2279, In Russian: Магруппов М.А., Абдурахманов У. Высокомолек. соед., 22A, 10, 2279 (1980).
- [7] Umarov A.V., Abdurakhmanov U., Faiziev A.R., Magrupov M.A., PTE (Prikladnaya Tekhnicheskaya Elektronika), 1985, 06, 206, In Russian: Умаров А.В., Абдурахманов У., Файзиев А.Р., Магруппов М.А. ПТЭ, 1985, №6, с.206.
- [8] Abdurahmanov U., Sharipov Sh., Rakhimova Y., Karabaeva M., Baydjanov M., Conductivity and Permittivity of Nickel-Nanoparticle-Containing Ceramic Materials in the Vicinity of Percolation Threshold, Journal of the American Ceramic Society, 2006, 89, 09, 2946–2948.
- [9] Abdurakhmanov U., Boitmuratov F.T., Mukhamedov G.I., Fionov A.S., Yurkov G.Yu., Electric Conductivity of Composite Materials Based on Phenylon Matrices and Nickel Particles, Journal of Communications Technology and Electronics, 2010, 55, 02, 221–224.
- [10] Vinogradov G.A., Misurkin I.A., Ovchinnikov A.A., Theoretical and Experimental Chemistry, 1976, 12, 723, In Russian: Виноградов Г.А., Мисуркин И.А., Овчинников А.А. Теор. эксперим. химия, 1976, т. 12, с. 723.
- [11] Balberg I., Azulay D., Toker D., Millo O., Percolation and Tunneling in Composite Materials, International Journal of Modern Physics B, 2004, 18, 2091–2121.
- [12] Kirkpatrick V., Theory and Properties of Disordered Materials, Bonch-Bruевич, V. L., Mir, , 1977, In Russian: Киркпатрик В. Сб. «Теория и свойства неупорядоченных материалов», под ред. В.Л. Бонч-Бруевича, «Мир» 1977г.
- [13] Efros A.L., Shklovskii B.I., Critical Behaviour of Conductivity and Dielectric Constant Near the Metal–Non-Metal Transition Threshold, Physica Status Solidi B, 1976, 76, 475–485.
- [14] Mott N.F., Journal of Non-Crystalline Solids, 1968, 1, 01, 1–9.
- [15] Abdurahmanov U., Rakhimova Y., Mukhamedov G., Balberg I., Temperature Dependence of the Conductivity in Ceramic Materials Containing Nickel Nanoparticles, Journal of the American Ceramic Society, 2009, 92, 03, 661–664.
- [16] Boymuratov F.T., Abdurakhmanov U., Isayev X., Saidqulov D., Electrical conductivity and permittivity of metal-polymer composites, Uzbekistan Journal of Polymers, 2023, 2, 01, 23–32.
- [17] Zabrodsky A.G., Zinov'yeva K.N., JETP Letters, 1983, 37, 08, 369, In Russian: Забродский А.Г., Зиновьева К.Н. Письма в ЖЭТФ, 1983, т.37, №8, с.369.

**Отказ от ответственности/Примечание издателя:** Заявления, мнения и данные, содержащиеся во всех публикациях, принадлежат исключительно отдельным лицам. Авторы и участники, а Журнал и редакторы. Журнал и редакторы не несут ответственности за любой ущерб, нанесенный людям или имуществу, возникшее в результате любых идей, методов, инструкций или продуктов, упомянутых в контенте.

**Disclaimer of liability/Publisher's Note:** The statements, opinions and data contained in all publications belong exclusively to individuals. The authors and participants, and the Journal and the editors. The journal and the editors are not responsible for any damage caused to people or property resulting from any ideas, methods, instructions or products mentioned in the content.