

# ВОЗДЕЙСТВИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ И ТЕМПЕРАТУРЫ НА МЕХАНИЗМЫ ТОКОВ УТЕЧКИ ЭЛЕКТРОРЕОЛОГИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА, СОДЕРЖАЩЕГО АЛЮМОНИКЕЛАТ СТРОНЦИЯ ПЕРОВСКИТОПОДОБНОЙ СТРУКТУРЫ

Е. В. Коробко<sup>1</sup>, И. М. Харламова<sup>1</sup>, Л. В. Махнач<sup>2</sup>

---

<sup>1)</sup> *Институт тепло-и массообмена имени А.В. Лыкова НАН Беларуси,  
ул. П.Бровки, 15, 220072 Минск, Беларусь, e-mail: evkorobko@gmail.com*

<sup>2)</sup> *Белорусский государственный университет, пр.Независимости, 4, 220030 Минск, Беларусь*

Определены механизмы проводимости электрореологического материала в условиях сильного электрического поля и температурного воздействия. Обнаружены токи утечки, вызванные такими механизмами проводимости как эффект Пула-Френкеля, полевая эмиссия с ловушек, туннелирование Фаулера-Нордгейма, эмиссия Шоттки и др.

**Ключевые слова:** электрореологический материал; перовскитоподобные сложные оксиды; ток утечки; механизмы проводимости.

## EFFECT OF ELECTRIC FIELD AND TEMPERATURE ON LEAKAGE CURRENT MECHANISMS OF ELECTORHEOLOGICAL MATERIAL CONTAINING PEROVSKITE-LIKE STRONTIUM ALUMONIKELATE

E. V. Korobko<sup>1</sup>, I. M. Kharlamova<sup>1</sup>, L. V. Makhnach<sup>2</sup>

---

<sup>1)</sup> *Laboratory of Rheophysics and Macrokinetics, A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute,  
National Academy of Sciences of Belarus, Brovki str. 15, 220072 Minsk, Belarus*

<sup>2)</sup> *Belarusian State University, Nezavisimosti av. 4, 220030 Minsk, Belarus  
Corresponding author: Evguenia Korobko (evkorobko@gmail.com)*

The mechanisms of conduction of an electrorheological material under conditions of a strong electric field and temperature influence are determined. Leakage currents caused by such conduction mechanisms as the Poole-Frenkel emission, field emission from traps, Fowler-Nordheim tunneling, Schottky emission, etc. have been found.

**Key words:** electrorheological material; perovskite-like complex oxides; leakage current; conduction mechanisms.

### ВВЕДЕНИЕ

Электрореологические материалы (ЭРМ) обратимо изменяют реологические свойства в сильных электрических полях при управлении структурой дисперсной фазы, обусловленной взаимодействием поляризованных частиц. В качестве дисперсной фазы в ЭРМ используются микро- и наноразмерные полупроводниковые и диэлектрические материалы органической и неорганической природы, дисперсионной средой является диэлектрическое масло. ЭРМ могут использоваться в устройствах гидроавтоматики, виброзащитных приспособлениях для прецизионной аппаратуры, амортизаторах для мобильных машин и др. Однако их применение может быть ограничено в широком температурном диапазоне из-за снижающегося отклика материала

в электрическом поле и возникающих токов утечки. В данной работе были проанализированы механизмы проводимости, вызывающие токи утечки ЭРМ, содержащего частицы алюмоникелата стронция с перовскитоподобной структурой, под действием сильных электрических полей и температуры.

### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В качестве дисперсной фазы в ЭРМ использовали частицы алюмоникелата стронция  $\text{Sr}_3\text{TiAl}_{0,5}\text{Ni}_{0,5}\text{O}_7$  с перовскитоподобной структурой, дисперсионной средой служило диэлектрическое масло. Образцы алюмоникелата стронция получали из нитратов и оксидов соответствующих металлов твердофазным методом при температуре обжига 1280–1300 °С в течение 20 ч в токе  $\text{O}_2$ . Электрореологическую активность полученных образцов определяли по изменению напряжения сдвига ( $\tau$ ) и плотности тока ( $j$ ) ЭРМ, содержащего 20 вес.% дисперсной фазы в диэлектрическом масле, при изменении напряженности электрического поля. Напряжение сдвига и плотность тока ЭРМ определяли с использованием реометра Physica MCR 301 фирмы Anton Paar с соосноцилиндрической измерительной ячейкой при изменении температуры от 20 °С до 80 °С, напряженности электрического поля от 0 до 3,5 кВ/мм и скорости сдвига от 0,1 до 100  $\text{с}^{-1}$ . Для определения механизмов проводимости были рассмотрены вольтамперные характеристики (ВАХ) ЭРМ, построенные в соответствующих координатах.

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рисунке 1 представлены зависимости напряжения сдвига ( $\tau$ ) и плотности тока ( $j$ ) ЭРМ, содержащего 20 вес.% частиц алюмоникелата стронция в диэлектрическом синтетическом масле, от напряженности электрического поля ( $E$ ) и температуры ( $T$ ).

Из рисунка 1, *а*, *б* видно, что напряжение сдвига и плотность тока ЭРМ увеличивается с ростом напряженности электрического поля во всем диапазоне исследуемых температур. Зависимость  $j(E)$  (рис. 1, *б*) имеет экспоненциальный характер роста плотности тока ЭРМ при последовательном увеличении напряженности электрического поля во всем диапазоне исследуемых температур, что показывает отсутствие омической проводимости. С увеличением температуры напряжение сдвига убывает (рис. 1*в*), плотность тока растет начиная с 1 кВ/мм практически одинаково в диапазоне температур  $T$  от 20 до 60 °С. При  $T = 80$  °С происходит снижение значений плотности тока (рис. 1, *з*).

В изучении электропроводности ЭРМ природа тока утечки является одним из ключевых вопросов. Для определения механизмов проводимости, которые обуславливают токи утечки, были представлены различные ВАХ в соответствующих координатах. Наличие разных механизмов проводимости помогает объяснить зависимость токов утечки от таких внешних воздействий как напряженность электрического поля и тепловое воздействие. Также следует принимать во внимание, что увеличение концентрации носителей заряда в ЭРМ может быть вызвано несколькими различными механизмами действия электрического поля [1–3].

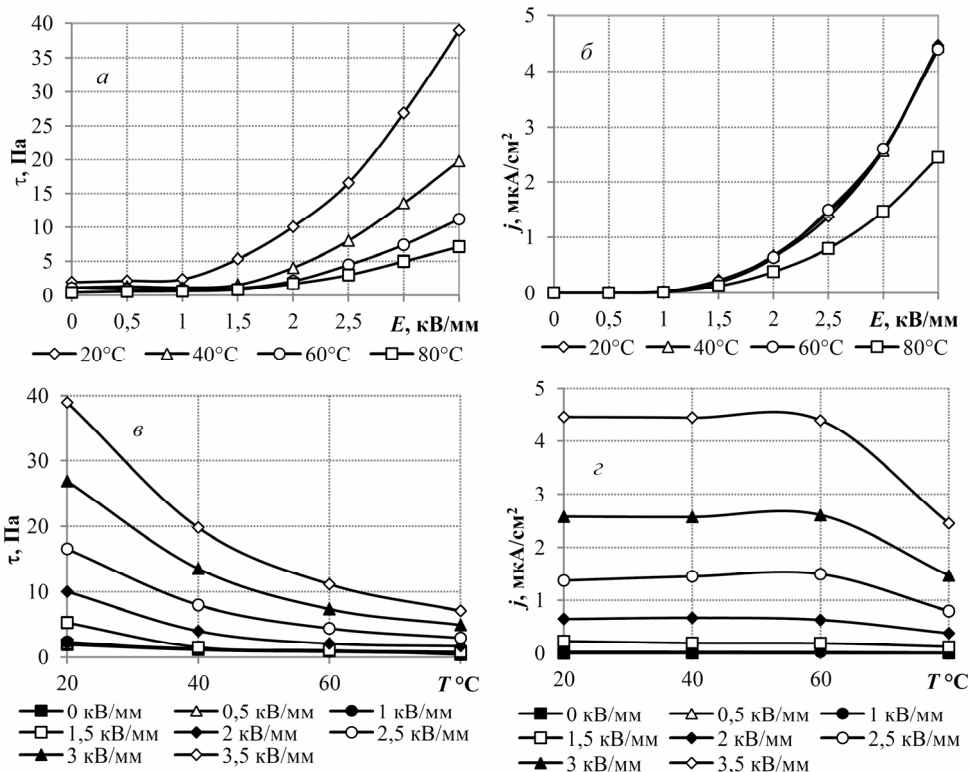


Рисунок 1. напряжения сдвига и плотности тока от напряженности электрического поля (а, б) и от температуры (в, г) ЭРМ, содержащего 20 вес.% алюмоникелата стронция  $\text{Sr}_3\text{TiAl}_{0.5}\text{Ni}_{0.5}\text{O}_7$ , при скорости сдвига  $\dot{\gamma} = 15 \text{ s}^{-1}$

При увеличении напряженности электрического поля первым начинает действовать механизм термоэлектронной ионизации (эффект Пула-Френкеля), который сводится к облегчению отрыва электрона от атома. Энергия активации, необходимая для теплового заброса электрона в зону проводимости уменьшается. Если электропроводность обусловлена таким эффектом, то ВАХ будет носить линейный характер в координатах натурального логарифма  $\ln(j/E)$  от  $\sqrt{E}$ . В данном случае эффект Пула-Френкеля проявляется при  $E \geq 1,5 \text{ кВ/мм}$  (рис. 2, а).

При больших полях или нагреве эффект Пула-Френкеля трансформируется в ловушечное туннелирование или полевую эмиссию электронов с ловушек. Для выявления данного механизма проводимости ВАХ представляют в координатах  $\ln(j/E^2)$  от  $1/E$  и аппроксимируют линейной зависимостью (рис. 2б). Установлено, что полевая эмиссия вносит свой вклад в проводимость ЭРМ при напряженности электрического поля  $E \geq 1,5 \text{ кВ/мм}$ .

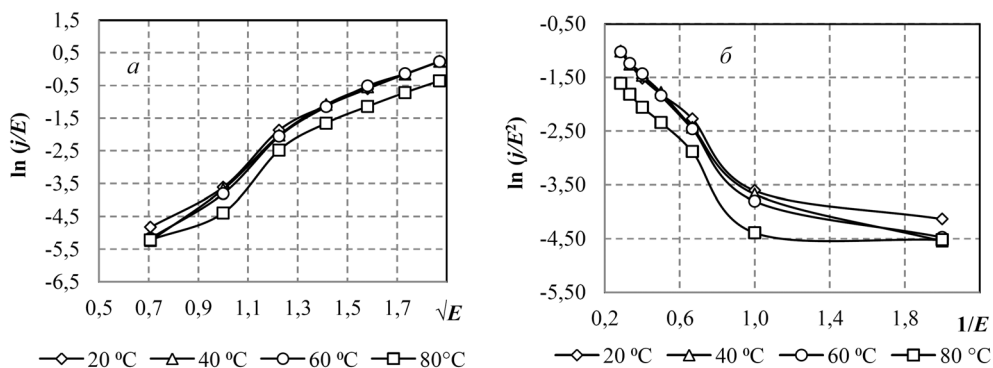


Рисунок 2. ВАХ ЭРМ в координатах Пула-Френкеля (а) и полевой эмиссии (б) при различных температурах

Для определения тока, ограниченного пространственным зарядом (ТОПЗ), созданного электронами, инжектированными из электрода в ЭРМ, ВАХ представляют в логарифмических координатах зависимости  $\ln j$  от  $\ln E$ , которые имеют линейный характер при  $E \geq 1,5$  кВ/мм, что свидетельствует о наличии пространственного заряда (рис. 3, а). Эмиссия электронов из металлического контакта в зону проводимости полупроводника путем их теплового переброса через потенциальный барьер при наличии электрического поля называется термоэлектронной эмиссией (эмиссией Шоттки). ВАХ, характеризующие данный эффект, представляют в системе координат  $\ln j$  от  $\sqrt{E}$ . Полученные экспериментальные результаты в данной системе координат аппроксимируются линейной зависимостью при напряженности электрического поля  $E \geq 1,5$  кВ/мм, подтверждающей вклад эмиссии Шоттки (рис. 3, б).

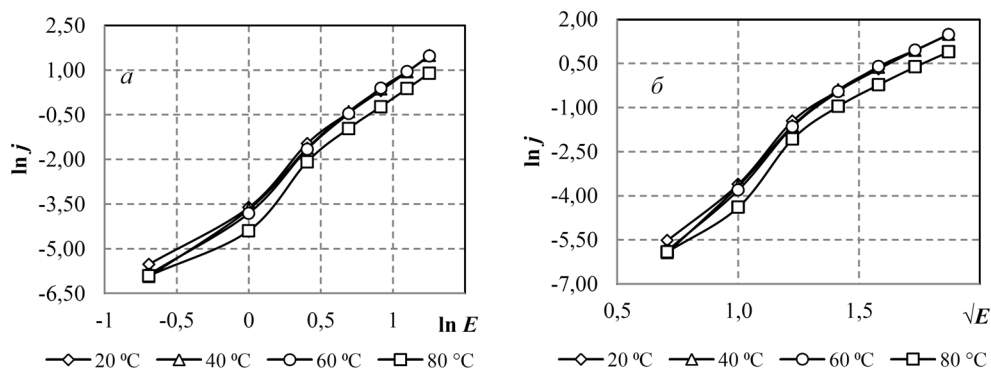
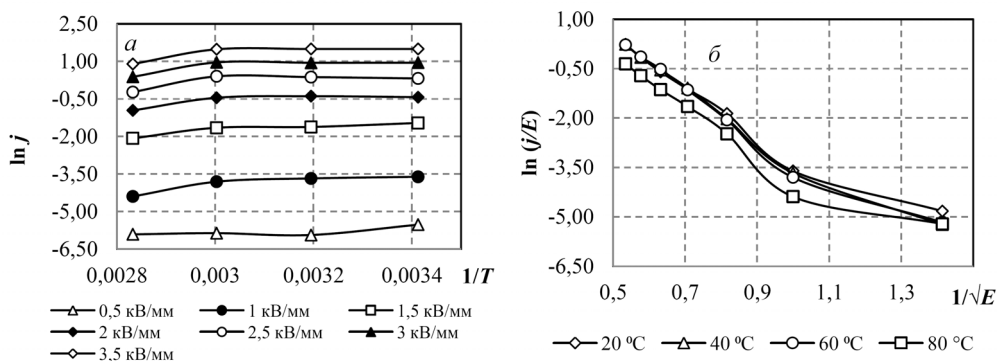


Рисунок 3. ВАХ ЭРМ в логарифмических координатах (а) и в системе координат Шоттки (б) при различных температурах

Для определения влияния нагрева на увеличение проводимости ЭРМ полученные экспериментальные данные представляются также в системе координат Аррениуса  $\ln j$  от  $1/kT$ . В диапазоне температур от 20 до 60 °C значения плотности тока практически не изменяются, при  $T > 60$  °C начинается их снижение (рис. 4, а). Если электроны преодолевают потенциальный барьер на границе металл-полупроводник пу-

тем туннельного эффекта Фаулера-Нордгейма, то ток зависит только от величины электрического поля. Для выявления наличия этого механизма проводимости ВАХ представляют в системе координат  $\ln j/E$  от  $1/\sqrt{E}$ .



**Рисунок 4.** ВАХ ЭРМ в координатах Аррейниуса (а) и Фаулера-Нордгейма (б)

В этой системе координат ВАХ образца ЭРМ аппроксимируются линейной зависимостью в электрическом поле напряженностью  $E \geq 1,5$  кВ/мм (рис. 4, б), что дает возможность предположить, что проводимость вызвана туннелированием Фаулера-Нордгейма.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Установлено, что токи утечки ЭРМ, содержащего частицы алюмоникелата стронция с перовскитоподобной структурой, возникают при температурном воздействии и напряженности электрического поля от 1,5 кВ/мм. Определено, что возникновению токов утечки способствуют следующие механизмы проводимости: эффект Пула-Френкеля, полевая эмиссия с ловушек, туннелирование Фаулера-Нордгейма, ТОПЗ, эмиссия Шоттки, что характерно для полупроводниковых материалов.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Шалимова, К. В. Физика полупроводников / К. В. Шалимова. – М. : Энергоатомиздат, 1985. – 392 с.
2. Аскеров, Б. М. Электронные явления переноса в полупроводниках / Б. М. Аскеров. – М. : Наука, 1985. – 320 с.
3. Sze, S. M. Semiconductor devices, physics and technology / S. M. Sze. – New York: John Wiley & Sons Inc., 2002. – 574 p.

### ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ КЕРАМИКА НА ОСНОВЕ СЛОИСТОГО КОБАЛЬТИТА НАТРИЯ

**Н. С. Красуцкая, А. И. Клындюк**

*Белорусский государственный технологический университет,  
ул. Свердлова, 13а, 220006 Минск, Беларусь, e-mail: klyndyuk@belstu.by*

Твердофазным методом получены и охарактеризованы оксидные термоэлектрики  $\text{Na}_{0,55}\text{Co}_{0,9}\text{M}_{0,1}\text{O}_2$  ( $M = \text{Cr}, \text{Co}, \text{W}$ ). Показано, что частичное замещение в  $\text{Na}_{0,55}\text{CoO}_2$  кобальта другими металлами позволяет значительно улучшить функциональные характеристики этой фазы. Так, показатель термоэлектрической добротности твердого раствора