

$\alpha = (-1,23 \pm 0,02) \%K^{-1}$; коэффициент температурной чувствительности
 $B = (1090 \pm 20) K$.

Работа выполнена в рамках программы союзного государства «Технология-СГ» задание 2.3.2.2.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Технология тонких пленок. Справочник. Под ред. Л. Майссела, Р. Глэнга. Том 1. М.: Советское радио. 1977.
2. Влияние ориентации кристаллитов на электрические свойства плёнок антимонида индия (InSb) на подложках из арсенида галлия (GaAs), полученных методом взрывного термического испарения / В.В. Углов, А.П. Драпеза, Е.А. Колесникова, А.К. Кулешов, Д.П. Русальский // Прикладные проблемы оптики, информатики, радиофизики и физики конденсированного состояния, матер. V междунар. науч.-практ. конф., Минск, 16-17 мая 2019 г.. – М-во образования РБ, НИУ «Ин-т прикладных физических проблем им. А.Н.Севченко» – Минск, 2019 –С. 267–269.
3. Michael S Shur. Handbook Series on Semiconductor Parameters - Volume 1: Si, Ge, C (Diamond), Gaas, Gap, Gasb, Inas, Inp, Insb / Michael S Shur, Gennady Sh Gildenblat, Yu A Goldberg. – 1999.

ДОМИНИРУЮЩИЕ МЕХАНИЗМЫ ТОКОВ УТЕЧКИ ЭЛЕКТРОРЕОЛОГИЧЕСКОЙ ЖИДКОСТИ С НАНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИМ ОРТОФОСФАТОМ АЛЮМИНИЯ

Е. В. Коробко, З. А. Новикова

*Институт тепло-и массообмена имени А.В. Лыкова НАН Беларуси, Минск, Беларусь,
e-mail: evkorobko@gmail.com*

Определены механизмы токов утечки в электрореологической жидкости при различных температурных воздействиях в сильном электрическом поле. Выявлены такие механизмы проводимости как термоэлектронная ионизация, ударная ионизация, эмиссия Шоттки, полевая эмиссия с ловушек и др.

Ключевые слова: электрореологическая жидкость; ток утечки; механизмы проводимости.

DOMINANT MECHANISMS OF LEAKAGE CURRENTS OF ELECTRORHEOLOGICAL FLUIDS WITH NANOCRYSTALLIC ALUMINUM ORTHOPHOSPHATE

E. V. Korobko, Z. A. Novikova

*Laboratory of Rheophysics and Macrokinetics, A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute,
National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus
Corresponding author: E. V. Korobko (evkorobko@gmail.com)*

The mechanisms of leakage currents of electrorheological fluid under various temperature effects in a strong electric field are determined. Such conduction mechanisms as thermionic ionization, impact ionization, Schottky emission, field emission from traps, etc. have been revealed.

Key words: electrorheological fluid; leakage current; conduction mechanisms.

ВВЕДЕНИЕ

Электрореологические (ЭР) жидкости исследуются как управляемые материалы для создания электромеханических устройств различного назначения. Для успешной работы таких устройств жидкости должны обладать эффективным откликом в электрическом поле (ЭР эффектом) в широком диапазоне температур и малыми величинами токов утечки. В настоящей работе основное внимание уделено выявлению доминирующих механизмов проводимости, обуславливающих токи утечки ЭР жидкости, содержащей частицы нанокристаллического дегидратированного ортофосфата алюминия, при температурных воздействиях.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В качестве дисперсной фазы ЭР жидкости использовали частицы нанокристаллического ортофосфата алюминия, дегидратированного при температуре 720 °С в течение 0,5 часа и имеющего структуру тридимит + кварц [1]. Напряжение сдвига (τ) и плотность тока (j) ЭР жидкости определяли с использованием реометра Physica MCR 301 фирмы Anton Paar с соосноцилиндрической измерительной ячейкой при изменении температуры от 20 °С до 120 °С, напряженности электрического поля от 0 до 3,5 кВ/мм и скорости сдвига от 0,1 до 100 с⁻¹. Особенности механизмов проводимости, обуславливающих ток утечки ЭР жидкости, определяли по характеру вольтамперных характеристик (ВАХ), построенных в соответствующих координатах.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Влияние напряженности электрического поля (E) и температуры (T) на напряжение сдвига (τ) и плотность тока (j) ЭР жидкости, содержащей 20 мас. % порошка нанокристаллического ортофосфата алюминия в диэлектрическом синтетическом масле, представлено на рисунке 1.

Из рисунка 1, *а* видно, что напряжение сдвига ЭР жидкости увеличивается с ростом напряженности электрического поля во всем диапазоне исследуемых температур. Максимальные величины напряжения сдвига ЭР жидкости наблюдаются в диапазоне температур от 60 °С до 80 °С при всех напряженностях электрического поля (рис. 1, *б*).

Из полученных ВАХ, построенных в соответствующих координатах, можно судить о некоторых механизмах проводимости, обуславливающих ток утечки, что позволит объяснить физическую основу зависимости токов утечки от внешнего воздействия (температуры и напряженности электрического поля). При этом следует учитывать, что возможны несколько различных механизмов воздействия электрического поля, приводящих к увеличению концентрации носителей заряда [2, 3].

Из рисунка 1, *б* видно, что ВАХ в координатах $j(E)$ имеют экспоненциальный характер роста плотности тока в ЭР жидкости при увеличении напряженности электрического поля во всем диапазоне исследуемых температур, что показывает отсутствие омической проводимости. Так, при $E \leq 1,5$ кВ/мм ток растет лавинообразно при $T > 100$ °С, а при $E > 1,5$ кВ/мм уже при $T > 80$ °С. Такой характер изменения плотности тока ЭР жидкости свидетельствует о наличии различных механизмов проводимости в зависимости от внешней температуры и напряженности электрического поля. Нагрев приводит к увеличению плотности тока утечки ЭР жидкости во всем диапазоне напряженности электрического поля (рис. 1, *з*), что может быть связано

с тепловым возбуждением и увеличением количества перешедших в зону проводимости носителей заряда.

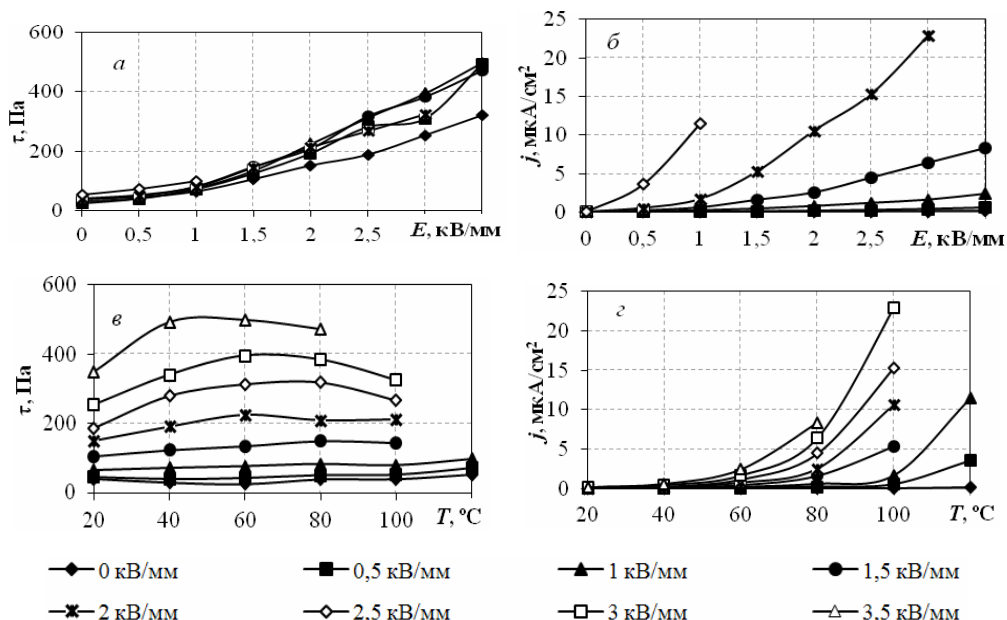


Рисунок 1. – Зависимость напряжения сдвига и плотности тока от напряженности электрического поля (а, б) и зависимости напряжения сдвига и плотности тока от температуры (в, г) ЭР жидкости, содержащей 20 вес. % порошка нанокристаллического ортофосфата алюминия, при скорости сдвига $\dot{\gamma} = 100 \text{ c}^{-1}$

Для определения влияния нагрева на увеличение проводимости ЭР жидкости экспериментальные результаты представлены также в системе координат Аррениуса $\ln j$ от $1/kT$ (рис. 2, а). При увеличении напряженности электрического поля первым начинает действовать механизм термоэлектронной ионизации, который способствует облегчению отрыва электрона от атома. Энергия активации, необходимая для теплового заброса электрона в зону проводимости, уменьшается. В этом случае электропроводность обусловлена эффектом Пула-Френкеля, о чем свидетельствует линейный характер ВАХ в координатах $\ln(j/E)$ от $\sqrt{E}$ (рис. 2, б).

Для определения тока, ограниченного пространственным зарядом (ТОПЗ), созданного электронами, инжектированными из электрода в ЭР жидкость, ВАХ представлены в логарифмических координатах зависимости $\ln j$ от $\ln E$ и имеют линейный характер (рис. 3, а). Тепловой выброс электронов из нагретого металла в зону проводимости полупроводника посредством их переброса через потенциальный барьер при наличии электрического поля называется термоэлектронной эмиссией или эмиссией Шоттки. Для выявления этого механизма проводимости экспериментальные результаты представлены в системе координат $\ln j$ от $\sqrt{E}$. Экспериментальные результаты в этой системе координат аппроксимируются линейной зависимостью, подтверждающей вклад эмиссии Шоттки в проводимость полупроводника (рис. 3, б).

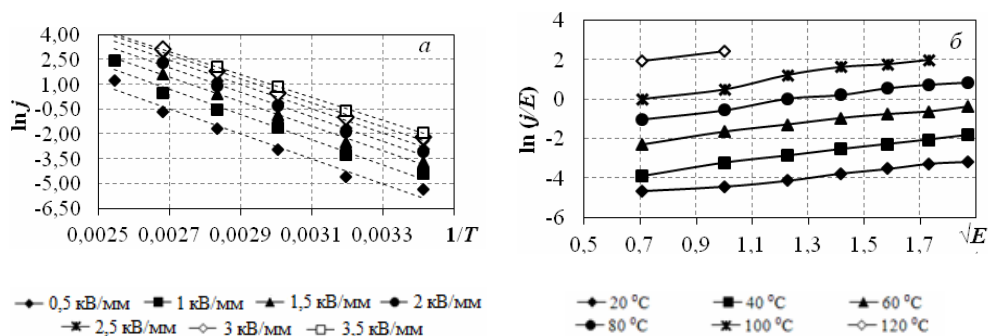


Рисунок 2. – ВАХ образца ЭР жидкости в координатах Аррениуса (а) и Пула-Френкеля (б)

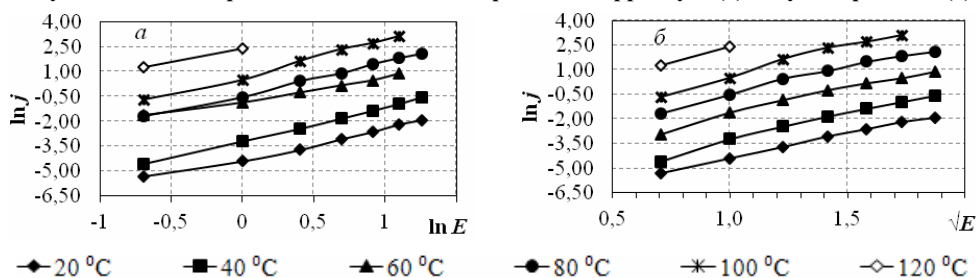


Рисунок 3. – ВАХ образца ЭР жидкости в логарифмических координатах (а) и в системе координат Шоттки (б)

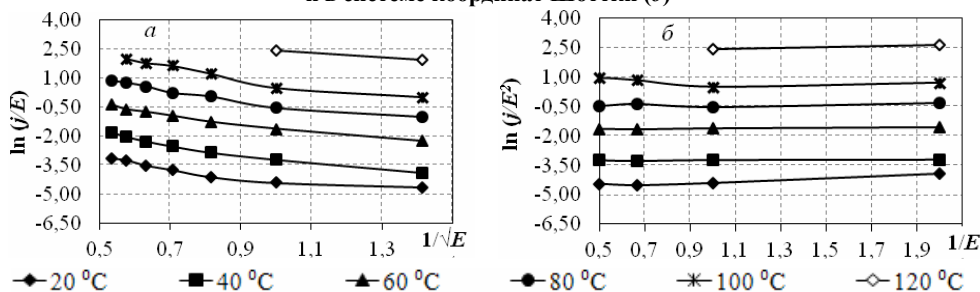


Рисунок 4. – ВАХ образца ЭР жидкости в координатах Фаулера-Нордгейма (а) и в координатах полевой эмиссии (б) при различных температурах

Когда электроны преодолевают потенциальный барьер на границе металл-полупроводник не за счет кинетической энергии их теплового движения, как при термоэлектронной эмиссии, а путем туннельного эффекта Фаулера-Нордгейма, то ток зависит только от величины напряженности электрического поля. Для выявления наличия этого механизма проводимости экспериментальные результаты представлены в системе координат $\ln j/E$ от $1/\sqrt{E}$. В данной системе координат ВАХ аппроксимируются линейной зависимостью, что позволяет предположить, что проводимость обусловлена туннелированием Фаулера-Нордгейма (рис. 4, а). При больших полях или нагреве эффект Пула-Френкеля трансформируется в ловушечное туннелирование или полевую эмиссию электронов с ловушек. Для обнаружения механизма проводимости полевой эмиссии электронов с ловушек ВАХ строят в координатах $\ln(j/E^2)$ от $1/E$ (рис. 4, б).

ВЫВОДЫ

Определение влияния температуры на токи утечки ЭР жидкости, содержащей частицы нанокристаллического дегидратированного ортофосфата алюминия, показало, что под влиянием сильного электрического поля проводимость частиц обусловлена такими механизмами, как термоэлектронная ионизация, ТОПЗ, эмиссия Шоттки, полевая эмиссия с ловушек и туннелирование Фаулера-Нордгейма, характерными для полупроводниковых материалов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Ещенко Л. С., Коробко Е. В., Жук Г. М., Новикова З. А. Получение и исследование нанокристаллического ортофосфата алюминия в качестве наполнителя электрореологических суспензий // Материалы V Международной научной конференции «Наноструктурные материалы-2016» (Минск, 22 – 25 ноября 2016 г. – Минск, 2016. – С. 150–153.
2. Shalimova KV (1985) Physics of Semiconductors. Moscow: Energoatomizdat.
3. Sze SM (1981) Physics of Semiconductors Devices. New York: John Wiley & Sons, Inc.

ПЕРЕНОС ЗАРЯДА В СТРУКТУРЕ ОКСИД ТИТАНА/КРЕМНИЙ ПРИ ОБЛУЧЕНИИ СОЛНЕЧНЫМ СВЕТОМ

А. А. Курапцова

*Белорусский Государственный Университет Информатики и Радиоэлектроники,
г. Минск, Беларусь, anku21qwerty@gmail.com*

В данной работе приводятся результаты моделирования переноса заряда в структуре пленка оксида титана на подложке из кремния при облучении солнечным светом. Моделирование проводилось в среде Comsol Multiphysics. В ходе моделирования исследовалось влияние толщины пленки оксида титана и длины волны излучения на величину и изменение во времени плотности электрического заряда на поверхности и в объеме структуры, концентрации носителей заряда. Также оценивалась величина и направление электронных и дырочных токов протекающих в структуре.

Ключевые слова: оксид титана; кремний; фотокатализ; электрический заряд.

CHARGE TRANSFER IN THE TITANIUM OXIDE / SILICON STRUCTURE UNDER SUN-LIGHT IRRADIATION

A. A. Kuraptsova

*Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Belarus
Corresponding author: A. A. Kuraptsova (anku21qwerty@gmail.com)*

In this work, we present the results of modeling the charge transfer in the titanium oxide/silicon structure under sun-light irradiation. The simulation was done with the Comsol Multiphysics environment. In the course of the simulation, the influence of the titanium oxide film thickness and the irradiation wavelength on the magnitude and time variation of the electric charge density on the surface and in the structure volume, the concentration of