

## REFERENCES

1. Bron O.B., Kuklev J.W., Larski B.A. Über die Wanderung von Starkstromlichtbogen in engen Spalten zwischen Isolierstoffwänden der Loschkammern. — D.D.R. XIX. Internationales Wissenschaftliches Kolloquium, Technische hochschule Ilmenau, 1974. pp. 195–200.
2. Elektricheskiye i elektronnyye apparaty. T. 1. Elektromekhanicheskiye apparaty: Uchebnik dlya vysshikh uchebnykh zavedenii/Pod redaktsiyey A.G. Godzhello, Yu.K. Rozanov — in Russ. (Electromechanical and electronic devices. Vol. 1. Electromechanical devices: Textbook for higher educational institutions/Edit. by A.G. Godzhello, Yu.K. Rosanov). Moscow, Publ. Centre «Akademiya», 2010, 352 p.
3. Bron O.B., Kuklev Yu.V., Lyarskii B.A. Elektromekhanika — in Russ. (Electromechanics), 1977, No. 11, pp. 1189–1194.
4. Bron O.B., Kuklev Yu.V., Lyarskii B.A. Elektrichestvo — in Russ. (Electricity), 1974, No. 10, pp. 24–29.
5. Bron O.B., Lyarskii B.A. Elektrichestvo — in Russ. (Electricity), 1973, No. 10, pp. 50–53.
6. Rodstein L.A. Elektricheskiye apparaty — in Russ. (Electrical apparatus). Moscow, Energoatomizdat, 1989, 303 p.
7. Bron O.B., Zhigalko Ye.F., Kuklev Yu.V., Lyarskii B.A. Elektrotekhnicheskaya promyshlennost'. Apparaty nizkogo napryazheniya — in Russ. (Electrotechnical industry. Low voltage devices), 1980, iss. 2, pp. 1–4.
8. Kuklev Yu.V. Gazodinamicheskiye protsessy v dugogasil'nykh ustroystvakh nizkovol'tnykh elektricheskikh apparatov — in Russ. (Gaz-dynamic process in the arc-suppression devices of low-voltage electrical apparatuses). Diss. for the Degree of Cand. Sci. (Eng.). Leningrad, Leningrad Polytechnic Institute, 1982, 174 p.
9. Tayev I.S. Elektricheskiye kontakty i dugogasil'nye ustroystva apparatov nizkogo napryazheniya — in Russ. (Electrical contacts and arc interrupters of low voltage devices). Moscow, Publ. «Energiya», 1973, 423 p.
10. Appolonskii S.M., Belyayev V.L., Kuklev Yu.V. Fizika gasheniya dugi v elektricheskikh apparatakh (Physics of arc extinction in electrical apparatuses). St. Petersburg, Publ. «Troitskii most», 2015, 408 p.
11. Tayev I.S., Bul' B.K., Godzhello A.G. et al. Osnovy teorii elektricheskikh apparatov/Pod redaktsiyey I.S. Tayeva (Fundamentals of the theory of electrical apparatus/Edit. by I.S. Tayev). Moscow, Publ. «Vysshaya shkola», 1987, 452 p.
12. Zhelesnyak M.B., Miakanyan A.Kh. ZhTF — in Russ. (Technical Physics Journal), 1977, vol. 47, iss. 12, pp. 2497–2505.
13. Meshcheryakov V.P. Elektricheskaya duga bol'shoi moshchnosti v vykluchatelyakh. Chast' II. (High-power electric arc in switches. Part II). Ul'yanovsk, Publ. JSC «Kontaktor», 2008, 429 p.
14. Novikov O.Ya. Ustoichivost' elektricheskoi dugi (Stability of the electric arc). Leningrad, Publ. «Energiya», 1978, 160 p.
15. Podol'skii D.V. Chislennoye modelirovaniye elektromagnitnykh polei v avtomaticheskikh vozduzhnykh vyklyuchatelyakh nizkogo napryazheniya (Numerical modeling of electromagnetic field in automatic air circuit breakers). Diss. for the Degree of Cand. Sci. (Eng.). Ul'yanovsk, Ul'yanovsk State University, 1999.
16. Fridrikhov S.A., Movnin S.M. Fizicheskiye osnovy elektronnoi tekhniki: Uchebnik dlya vuzov «Elektronnyye pribory (Physical basis of electronic engineering: Textbook for high schools «Electronic devices»). Moscow, Publ. «Vysshaya Shkola», 1982, 608 p.

[01.12.2016]

\* \* \*

Электричество, 2017, № 5, с. 57–61

DOI:10.24160/0013-5380-2017-5-57-61

## Электрически активные центры захвата носителей заряда в диоксиде кремния SiO<sub>2</sub> и кристаллах слюды

НОВИКОВ Г.К., ФЕДЧИШИН В.В.

Исследование электрически активных центров захвата (ЭАЦЗ) в слюде проводилось методом электретной поляриметрии в электрическом газовом коронном разряде (ЭГКР) и методом токов термостимулированной деполяризации ТСД. Представлены экспериментальные результаты исследования влияния радиационной и термической модификации на электретные свойства слюды. Экспериментально доказан факт тушения электретной поляризации в слоях диоксида кремния, полученных в результате высокотемпературного отжига монокристаллов слюды мусковит. Показано, что ЭАЦЗ в кристаллах слюды являются радиационные вакансионные дефекты K<sup>+</sup>ОН ионной кристаллической подрешетки слюды.

Ключевые слова: кристаллы слюды, диоксид кремния, носители заряда, электрические активные центры захвата

Методы измерения спектров токов термостимулированной деполяризации (ТСД) и высоковольтной электретной поляриметрии  $U_3(j_{\text{ЭГКР}})$  могут использоваться для изучения физической природы электрически активных центров захвата (ЭАЦЗ) электронов и дырок в SiO<sub>2</sub>, слюдосодержащих диэлектриках и кристаллах слюды [1–3], для измерения подвижности электронов и дырок  $\mu_{e,p}$  в кристаллах слюды [4–6].

Исследовались механизмы накопления диэлектрической рекомбинации заряда в слюде (мусковит, флогопит), тонких слоях диоксида кремния SiO<sub>2</sub> и кабельных полимерах. Экспериментальные результаты исследования электретных свойств SiO<sub>2</sub> и слюд сравнивались с результатами исследования полимерных электретов. Для сравнения использовались неполярные и полярные электроизоляционные пленки полиэтилена высокой (ПЭВП) и низ-

кой (ПЭНП) плотности, политетрафторэтилена (ПТФЭ), полиэтилентерефталата (ПЭТФ) и поликарбоната (ПК) разной толщины  $h$ .

В [3, 4] экспериментально проверялось выполнение закона Ома для электретной поляризации слюдяных и полимерных диэлектриков в электрическом газовом коронном разряде (ЭГКР):

$$U_{\text{э}} = j_{\text{эгкр}} N_{\text{эацз}} \sigma_{\text{эацз}} h, \quad (1)$$

где  $U_{\text{э}}$  – электретная разность потенциалов;  $j_{\text{эгкр}}$  – плотность тока ЭГКР;  $N_{\text{эацз}}$ ,  $\sigma_{\text{эацз}}$  – концентрация и сечение электрически активных центров захвата электронов и дырок;  $h$  – толщина поляризуемого диэлектрика.

Впервые полученное в [3] уравнение (1) удобно использовать для объяснения экспериментальных результатов исследования электретной поляризации органических и неорганических диэлектриков с использованием специального высоковольтного прибора – электретного поляриметра [5].

Образцы модифицировали действием излучения  $\gamma\text{Co}^{60}$ , рентгеновского излучения барьерного разряда ЭГБР и термоотжига слюды при  $T = 400$  и  $700$  °С.

Результаты исследования ЭАЦЗ модифицированных органических и неорганических диэлектриков (рис. 1 и 2) используются в электретной дозиметрии мягких ионизирующих излучений электри-

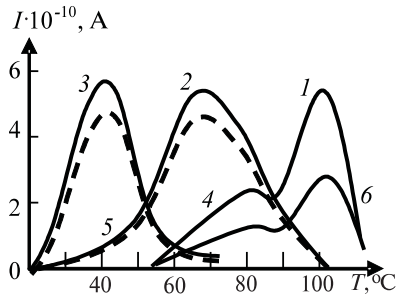


Рис. 1. Влияние дозы излучения ЭГБР (кривые 1, 2, 3) и  $\gamma$  излучения  $\text{Co}^{60}$  (4, 5) на спектры токов ТСД электретов из пленки ПЭТФ,  $h = 10$  мкм: 1 – до облучения; 2 –  $t_{\text{эгбр}} = 1$  ч; 3 –  $t_{\text{эгбр}} = 2$  ч; 4 –  $D = 0,5$  Мрад; 5 –  $D = 1$  Мрад; 6 – отжиг 1 ч при  $T = 80^\circ\text{C}$  ПЭТФ, облученного 2 ч в ЭГБР

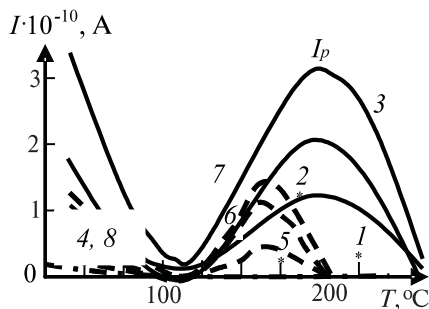


Рис. 2. Влияние дозы  $\gamma$  излучения  $\text{Co}^{60}$  на спектры токов ТСД электретов из слюды мусковит (кривые 1, 2, 3, 4),  $h = 40$  мкм и флогопит (5, 6, 7, 8),  $h = 40$  мкм: 1, 5 –  $D = 0,3$  Мрад; 2, 5 –  $D = 0,6$  Мрад; 3, 6 –  $D = 0,9$  Мрад; 4, 8 – до облучения отжиг 1 ч при  $T = 400$  °С

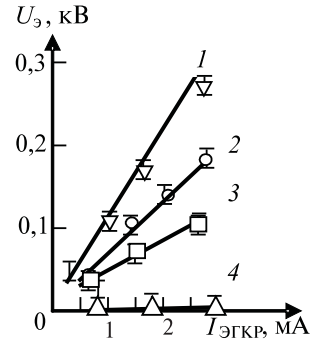


Рис. 3. Влияние длительности отжига  $t$  при  $T = 400$  °С на зависимость  $U_{\text{э}}(I_{\text{эгкр}})$  мусковитовых коронэлектретов,  $h = 10$  мкм: 1 – до отжига; 2 –  $t = 5$  мин; 3 –  $t = 30$  мин; 4 –  $t = 60$  мин

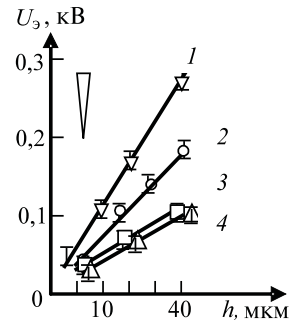


Рис. 4. Зависимость  $U_{\text{э}}(h)$  коронэлектретов ПЭТФ (1), ПК (2), ПЭНП (3), ПТФЭ (4),  $E_{\text{эгкр}} = 0,11$  кВ/мм (игла–плоскость,  $\varphi = 18^\circ$ )

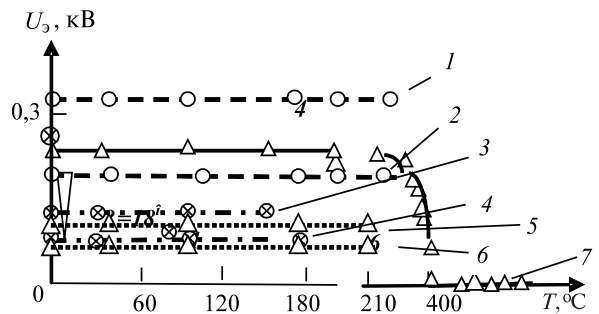


Рис. 5. Зависимости  $U_{\text{э}} = f(T)$  ( $I_{\text{эгкр}} = 1$  мА) коронэлектретов из пленки несшитого (1) и сшитого (2) ПЭТФ-1; несшитого (3) и сшитого (4) ПЭНП; несшитого (5) и сшитого (6) ПЭВП; кристалла слюды мусковит (7)

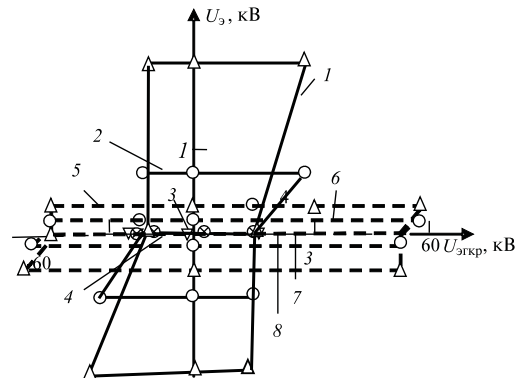


Рис. 6. Влияние длительности отжига  $t$  при  $T = 400$  и  $700$  °С на зависимость  $U_{\text{э}}(U_{\text{эгкр}})$  облученных ( $\gamma\text{Co}^{60}$ ,  $D = 1$  Мрад) мусковитовых коронэлектретов,  $h = 10$  мкм: 1 – до отжига; 2 –  $t = 5$  мин; 3 –  $t = 60$  мин; 4 –  $t = 1$  ч,  $T = 700$  °С – воздух,  $P = 0$  кгс/см<sup>2</sup>; 5 – до отжига, 6 –  $t = 5$  мин; 7 –  $t = 60$  мин; 8 –  $t = 1$  ч,  $T = 700$  °С – трансформаторное масло

ческого газового разряда и для определения степени радиационной сшивки полиолефинов [5–12].

На рис. 3 и 4 представлены зависимости  $U_3(U_{ЭГКР})$  и  $U_3(I_{ЭГКР})$  для короноэлектретов из кристаллов слюды и пленок ПЭНП, ПТФЭ, ПЭТФ и ПК толщиной 10 мкм, поляризованных в системе электродов «игла–плоскость». Видно, что при отсутствии тока коронного разряда электретная поляризация отсутствует и зависимости  $U_3f(I_{ЭГКР})$  и  $U_3f(h)$  носят линейный характер. Экспериментальные результаты на рис. 3 и 6 являются хорошим подтверждением справедливости формулы (1) при поляризации короноэлектретов. Из рис. 4 также следует, что соотношение между электретной поляризуемостью однотолщинных неполярных ПЭНП, ПТФЭ и полярных ПЭТФ и ПК соответствует пропорции 1:1:3:2, что подтверждает предложенную ранее [12] схему электретной поляризации полярных и неполярных полимеров.

Эксперименты показали, что после радиационной сшивки полимеров и высокотемпературного отжига слюды в них существенным образом уменьшается концентрация электрически активных центров захвата носителей заряда  $N_{эацз}$  (рис. 1 и 6). Представленные экспериментальные результаты являются убедительным доказательством выполнения закона Ома (1) при поляризации органических и неорганических короноэлектретов.

Ранее в [1, 11, 12] экспериментально было показано, что процесс радиационного сшивания полимеров и термического отжига слюды всегда сопровождается значительным выделением воды за счет выхода радиационного водорода при радиационной сшивке полимеров и выделения кристаллического гидроксила, а также при термическом разрушении  $K^+OH^-$ -ионной кристаллической подрешетки слюд.

Экспериментами по исследованию влияния симметричной механической вытяжки на электретную поляризацию полярных и неполярных полимеров (рис. 8) показано, что ЭАЦЗ в полярных и неполярных полимерных диэлектриках имеют дипольную физическую природу.

При симметричной механической вытяжке полимера ЭАЦЗ уменьшает составляющую своего дипольного момента  $\bar{\mu}_n$  в направлении нормали к поверхности диэлектрика, что определяет вероятность его возбуждения и сопровождается уменьшением вероятности захвата заряженной частицы в веществе электрета. Энергия возбуждения  $W$  полярного ЭАЦЗ пропорциональна квадрату скалярного произведения производной  $\bar{\mu}$  по нормальной координате на электрический вектор  $\bar{E}$ :

$$W = K \int \left( \frac{\partial \bar{\mu}}{\partial q} \bar{E} \right)^2 dn. \quad (3)$$

На рис. 7–9 схематически представлена электретная поляризация элементарных звеньев полимерных молекул ПТФЭ, ПЭТФ и ПК при облучении ионами униполярного положительного ЭГКР. При облучении траектория движения иона всегда направлена в сторону источника электрического поля (притягивающего диполя в структуре полимера). Согласно схеме рис. 7 при поляризации неполярных ПЭ и ПТФЭ положительные ионы ЭГКР вызывают электретную поляризацию за счет отрыва двух электронов только в двух нескомпенсированных полярных связях, расположенных в позициях 1 и 2 на концах полимерного звена. При поляризации полярного ПЭТФ (схема на рис. 8) молекулярное звено ПЭТФ в положительном ЭГКР теряет 6 электронов в позициях 1, 2, 3, 4, 5 и 6. При поляризации полярного ПК в тех же условиях молекулярное звено ПК теряет 4 электрона в позициях 1, 2, 3, 4.

Согласно схемам на рис. 7–9 при одновременном измерении электретной поляризации в униполярном положительном электрическом газовом коронном разряде ПЭ, ПЭТФ, ПК и ПЭТФ с использованием высоковольтного электретного поляриметра [7] должно быть получено для однотолщинных образцов соотношение поляризуемостей  $U_{3ПЭ}:U_{3ПТФЭ}:U_{3ПЭТФ}:U_{3ПК}=1:1:2:3$ , что соответствует полученным экспериментальным резуль-

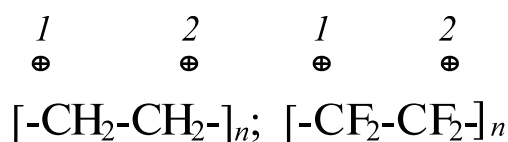


Рис. 7. Схематическое представление электретной поляризации элементарных звеньев неполярных ПЭ и ПТФЭ в униполярном ЭГКР

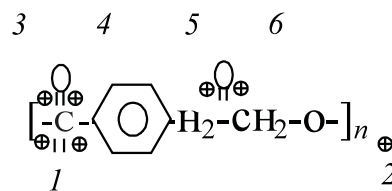


Рис. 8. Схематическое представление электретной поляризации элементарного звена полярного ПЭТФ в униполярном ЭГКР

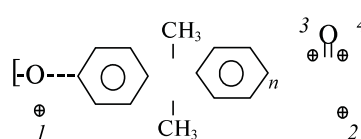


Рис. 9. Схематическое представление электретной поляризации элементарного звена полярного ПК в униполярном ЭГКР



татам (рис. 4 и 5) и подтверждает вывод о полярной физической природе ЭАЦЗ.

Экспериментально показано, что в результате термического отжига слюды [8, 9] имеет место обратимое и необратимое тушение их электретной поляризации. При нагревании образцов мусковитовых и флогопитовых слюд до температуры  $T = 400\text{ }^\circ\text{C}$  (в течение 1 ч) их электретная поляризация  $U_3$  и радиационно чувствительный максимум тока  $I_p$  в спектре ТСД обратимо уменьшаются до нулевого значения. При последующем облучении таких образцов определенной дозой  $D$  жесткого ионизирующего излучения  $\gamma\text{Co}^{60}$  ( $E=1,25\text{ МэВ}$ ) их электретная поляризация  $U_3$  и максимум тока ТСД  $I_p$  обратимо увеличиваются пропорционально поглощенной дозе  $\gamma$  излучения  $D$ . Этот полученный нами впервые экспериментальный результат предложено использовать в дозиметрии жесткого ионизирующего излучения  $\gamma\text{Co}^{60}$  и для определения геологического возраста слюдосодержащих горных пород [8, 9].

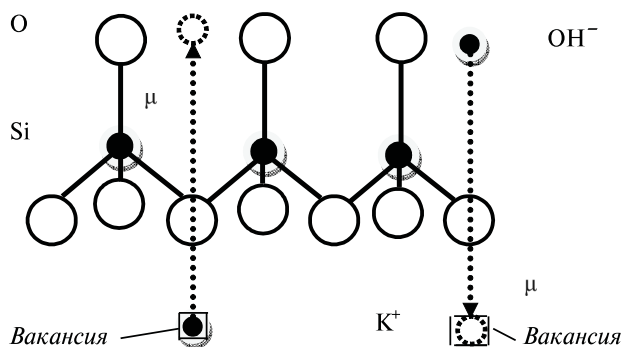


Рис. 10. Модель ЭАЦЗ в виде вакансионных дефектов  $\text{K}^+\text{OH}^-$  ионной кристаллической подрешетки слюды мусковит

При высокотемпературном вакуумном отжиге слюды ( $T > 700\text{ }^\circ\text{C}$ ) происходит необратимое тушение их электретной поляризуемости. В результате высокотемпературного вакуумного отжига при  $T > 700\text{ }^\circ\text{C}$  ионная кристаллическая подрешетка слюды необратимо разрушается [2, 4] (слюда необратимо преобразуется в тончайшие слои диоксида кремния  $\text{SiO}_2$ , сформированные неполярными кремний-кислородными тетраэдрами).

Таким образом, эксперименты по радиационной и термической модификации слюд позволяют сделать следующие выводы о процессе поляризации и физической природе ЭАЦЗ в кристаллах мусковитовых и флогопитовых слюд:

для слоев диоксида кремния  $\text{SiO}_2$ , кристаллов слюды мусковит, флогопит выполняется закон Ома и справедлива токовая модель поляризации электретов в электрическом газовом разряде;

в кристаллах слюды (мусковит и флогопит) при электретной поляризации ЭАЦЗ являются радиа-

ционные вакансионные дефекты  $\text{K}^+\text{OH}^-$  ионной кристаллической подрешетки слюд;

в диоксиде кремния  $\text{SiO}_2$ , полученном при вакуумном высокотемпературном отжиге ( $T > 700\text{ }^\circ\text{C}$ ) слюды мусковит, отсутствуют ЭАЦЗ, что сопровождается тушением электретной поляризации  $\text{SiO}_2$ .

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Новиков Г.К., Потапов В.В., Сулов К.В., Федчишин В.В. Электроизоляционная, кабельная и конденсаторная техника. — Иркутск: Изд-во ИргТУ, 2013, 136 с.
- Новиков Г.К. Ионизирующие излучения газового разряда и электретный эффект в полиолефиновых диэлектриках. — Изв. вузов. Физика, 2011, № 4, с. 17–22.
- Новиков Г.К., Федчишин В.В. Токовая модель и выполнение закона Ома при поляризации центров захвата в полимерных кабельных электретах. — Электротехника, 2011, № 10, с. 62–66.
- Новиков Г.К., Потапов В.В., Сулов К.В., Федчишин В.В. Электротехнологическое и конструкционное материаловедение. — Иркутск: Изд-во ИргТУ, 2014, 366 с.
- Новиков Г.К., Федчишин В.В. Подвижность носителей заряда в полимерных и слюдяных электретах. — Изв. вузов. Физика, 2014, № 12, с. 26 – 30.
- Новиков Г.К., Федчишин В.В. Рекомбинация и подвижность носителей заряда в полимерных и слюдяных электретах. — Изв. вузов. Химия и химическая технология, 2015, № 2, с. 18–21.
- Пат. № 2247974 (РФ). Способ контроля сшивки полиэтиленовой кабельной изоляции/ Г.К. Новиков, А.И. Смирнов, А.С. Жданов. — БИ, 2005, № 7.
- А.с. № 818358 (СССР), Способ определения дозы ионизирующего излучения/Г.К. Новиков, М.С. Мецик. — БИ, 1979, № 10.
- Пат. 2084005 (РФ). Способ определения возраста горных пород/Г.К. Новиков, М.С. Мецик. — БИ, 1997, № 4.
- Пат. 2008693 (РФ). Электретный дозиметр ионизирующего излучения/Г.К. Новиков, М.С. Мецик. — БИ, 1994, № 4.
- Новиков, Г.К., Мецик М.С. Электретный эффект и электрическая релаксация в кристаллах слюды. — Изв. вузов. Физика, 1991, № 10, с. 99–101.
- Новиков, Г.К. Поляризация и рекомбинация в электрически активных центрах захвата носителей заряда в кабельных полимерных диэлектриках и слюде. — Электротехника: сетевой электронный научный журнал, 2016, № 1, с. 62–66.

[12.12.2016]

*А в т о р ы : Новиков Геннадий Кириллович окончил физический факультет Иркутского государственного университета в 1971 г. Кандидатскую диссертацию «Электретный эффект и электрическая релаксация в полимерах и слюде» защитил в 1995 г. Доцент кафедры «Электроснабжение и электротехника» Иркутского национального исследовательского технического университета (ИРННТУ).*

*Федчишин Вадим Валентинович окончил в 1985 г. энергетический факультет Иркутского государственного технического университета. В 1996 г. защитил кандидатскую диссертацию «Повышение взрывобезопасности пылесистем с молотковыми мельницами в результате стендовых и промышленных исследований». Директор Института энергетики ИРННТУ.*

## Electrically Active Charge Trapping Centers in SiO<sub>2</sub> and Mica Crystals

**NOVIKOV Gennadii K.** (*Irkutsk National Research Technical University – INRTU, Irkutsk, Russia*) – Associate Professor, Cand. Sci. (Eng.)

**FEDCHISHIN Vadim V.** (*INRTU, Irkutsk, Russia*) – Head of Power Engineering Institute, Cand. Sci. (Eng.)

*Electrically active charge trapping centers (EATC) in mica were investigated using the method of electret polarimetry in electric gas corona discharge (EGCD) and using the method of thermally stimulated depolarization currents (TSD). The article presents the experimental results from studying the effect of radiation and thermal modification on the electret properties of mica. The fact of extinguishing electret polarization in the silicon dioxide layers obtained as a result of high-temperature annealing of muscovite mica crystals has been proven by experiment. It has been demonstrated that radiation vacancy defects of K<sup>+</sup>OH ion mica crystal sublattice play the role of EATCs in mica crystals.*

Key words: mica crystals, silicon dioxide, charge carriers, electric active trapping centers

### REFERENCES

1. **Novikov G.K., Potapov V.V., Suslov K.V., Fedchishin V.V.** *Elektroizolyatsionnaya, kabel'naya i kondensatornaya tekhnika* (Electrical insulating cable and capacitor technology). Irkutsk, Irkutsk State Technical University, 2013, 136 p.
2. **Novikov G.K.** *Izv. vuzov. Fizika – in Russ. (News of Higher Education Institutions. Physics)*, 2011, No. 4, pp. 17–22.
3. **Novikov G.K., Fedchishin V.V.** *Elektrotekhnika – in Russ. (Power Engineering)*, 2011, No. 10, pp. 62–66.
4. **Novikov G.K., Potapov V.V., Suslov K.L., Fedchishin V.V.** *Elektrotekhnologicheskoye i konstruksionnoye materialovedeniye* (Electro-technological and structural materials science). Irkutsk, Irkutsk State Technical University, 2014, 366 p.
5. **Novikov G.K., Fedchishin V.V.** *Izv. vuzov. Fizika – in Russ. (News of Higher Education Institutions. Physics)*, 2014, No. 12, pp. 26–30.
6. **Novikov G.K., Fedchishin V.V.** *Izv. vuzov. Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya – in Russ. (News of Higher Education Institutions. Chemistry and Chemical Technology)*, 2015, No. 2, pp. 18–21.
7. **Patent RF No. 2247974.** *Sposob kontrolya sshivki poliyetilenovoi kabel'noi izolyatsii* (The cross-linking polyethylene cable insulation)/G.K. Novikov, A.I. Smirnov, A.S. Zhdanov). Bulletin of inventions, 2005, No. 7.
8. **A.s. No. 818358 (SSSR).** *Sposob opredeleniya dozy ioniziruyushchego izlucheniya* (Method for determining the dose of ionizing radiation)/G.K. Novikov, M.S. Metsik). Bulletin of inventions, 1979, No. 10.
9. **Patent RF No. 2084005.** *Sposob opredeleniya vozrasta gornyykh porod* (Method for determining the age of rocks)/G.K. Novikov, M.S. Metsik). Bulletin of inventions, 1997, No. 4.
10. **Patent RF No. 2008693.** *Elektretnyi dozimetr ioniziruyushchego izlucheniya* (Electret dosimeter of ionizing radiation)/G.K. Novikov, M.S. Metsik). Bulletin of inventions, 1994, No. 4.
11. **Novikov G.K., Metsik M.S.** *Izv. vuzov. Fizika – in Russ. (News of Higher Education Institutions. Physics)*, 1991, No. 10, pp. 99–101.
12. **Novikov G.K.** *Elektrotekhnika: setevoi elektronnyi nauchnyi zhurnal*: <http://electrical-engineering.ru> (Current-rus. html)

[12.12.2016]