

Министерство науки и высшего образования
Российской Федерации
Федеральное государственное
бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Тверской государственный университет»

**ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ
ИЗУЧЕНИЯ КЛАСТЕРОВ,
НАНОСТРУКТУР
И НАНОМАТЕРИАЛОВ**

**PHYSICAL AND CHEMICAL ASPECTS
OF THE STUDY OF CLUSTERS,
NANOSTRUCTURES AND
NANOMATERIALS**

**FIZIKO-HIMIČESKIE ASPEKTY
IZUČENIÂ KLASTEROV,
NANOSTRUKTUR I NANOMATERIALOV**

МЕЖВУЗОВСКИЙ СБОРНИК НАУЧНЫХ ТРУДОВ

выпуск 11

ТВЕРЬ 2019

УДК 620.22:544+621.3.049.77+539.216.2:537.311.322: 530.145

ББК Ж36:Г5+В379

Ф50

Рецензирование статей осуществляется на основании Положения о рецензировании статей и материалов для опубликования в Межвузовском сборнике научных трудов «Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов».

Официальный сайт издания в сети Интернет:

<https://www.physchemaspects.ru>

Ф50 Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов [Текст]. – Тверь: Твер. гос. ун-т, 2019. – Вып. 11. – 680 с.

Зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций, свидетельство о регистрации СМИ ПИ № ФС 7747789 от 13.12.2011.

Издание составлено из оригинальных статей, кратких сообщений и обзоров теоретического и экспериментального характера, отражающих результаты исследований в области изучения физико-химических процессов с участием кластеров, наноструктур и наноматериалов физики, включая межфазные явления и нанотермодинамику. Сборник предназначен для научных и инженерно-технических работников, преподавателей ВУЗов, студентов и аспирантов. Издание подготовлено на кафедре общей физики Тверского государственного университета.

Переводное название: Physical and chemical aspects of the study of clusters, nanostructures and nanomaterials

Транслитерация названия: Fiziko-himičeskie aspekty izučeniâ klasterov, nanostruktur i nanomaterialov

УДК 620.22:544+621.3.049.77+539.216.2:537.311.322: 530.145

ББК Ж36:Г5+В379

Print ISSN 2226-4442

Online ISSN 2658-4360

© Коллектив авторов, 2019

© Тверской государственной
университет, 2019

**О НЕКОТОРЫХ АСПЕКТАХ ИССЛЕДОВАНИЯ
ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ В СПЕЦИАЛЬНЫХ СТЕКЛАХ
ЭЛЕКТРОННОЙ ОПТИКИ**

З.В. Шомахов^{1,2}, О.А. Молоканов¹, А.М. Кармоков¹

¹ФГБОУ ВО «Кабардино-Балкарский государственный университет
им. Х.М. Бербекова»

360004, Россия, Кабардино-Балкарская Республика, Нальчик, ул. Чернышевского, 173

²Институт прикладной математики и автоматизации

филиал ФГБНУ «ФНЦ «Кабардино-Балкарский научный центр РАН»

360000, Россия, Кабардино-Балкарская Республика, Нальчик, ул. Шортанова, 89 а
shozamir@yandex.ru

DOI: 10.26456/pcascnn/2019.11.277

Аннотация: Изучены закономерности изменения электрофизических свойств стекол *S87–2, S78–4, S78–5*, применяемых в электронной оптике. Проведен сравнительный анализ влияния пропущенного электрического тока на образование новой фазы и время достижения фазового равновесия в стеклах. Установлено, что отжиг приводит к равновесному состоянию, стабилизирует структуру, а также снижает электропроводность стекла.

Ключевые слова: микроканальная пластина, свинцово-силикатное стекло, боратно-бариевое стекло, удельная электропроводность, изотермический отжиг, электроперенос, фазовое равновесие.

1. Введение

Процессы, происходящие в стеклах, такие как фазовые превращения, сопровождающиеся образованием и ростом новых наноразмерных кристаллических фаз, играют важную роль при создании технологических процессов изготовления микроканальных пластин (МКП).

МКП – класс изделий электронной техники, предназначенных для работы в вакууме в качестве многоканальных детекторов, преобразователей и вторично-электронных усилителей пространственно-организованных потоков заряженных частиц и излучений [1, 2].

Электрофизические и эксплуатационные характеристики электронно-оптических преобразователей определяются, главным образом, физико-химическими свойствами стекол, используемых в МКП (свинцово-силикатные стекла) и для МКП (боратно-бариевые стекла).

В связи с этим исследования процессов фазообразования и их влияния на электрофизические свойства стекол, являются важными для совершенствования существующих и создания новых технологических процессов производства изделий электронной техники. Ранее нами в работе [3] были изучены закономерности изменения электрофизических свойств стекол *S87–2, S78–4, S78–5*, применяемых в электронной технике. Установлена корреляция между структурными изменениями и электрической проводимостью. Проведен сравнительный анализ влияния

пропущенного электрического тока на образование новой фазы и время достижения фазового равновесия в стеклах.

2. Экспериментальные результаты

В ходе изучения электропроводности образцы стекол подвергались высокотемпературному изотермическому отжигу. Каждый образец отжигался при одной из температур: 350, 400, 450 и 500 °С [4]. Время отжига для большинства образцов составляло 5 часов. Измерительное напряжение прикладывалось непрерывно как в ходе нагрева, так и в процессе отжига. В указанных условиях отжига (с непрерывным пропуском тока) свинцово-силикатные стекла С87–2 и С78–4 обнаруживают похожее поведение. При низких температурах отжига (350–400 °С) скорости изменения проводимости близки к нулю. С течением времени изотермического отжига удельная проводимость этих стекол увеличивается, тем интенсивнее, чем выше температура отжига. Уровень проводимости обоих этих стекол при высокой температуре (500 °С) стремится к $\sim 10^{-8}$ См/м [5].

В противоположность этому, у боратно-бариевого стекла С78–5 при каждой температуре изотермического отжига скорость изменения проводимости после первых $\sim 0,5$ часа весьма мала. Конечный уровень проводимости тем выше, чем выше температура отжига, и для 500 °С достигает $\sim 2 \cdot 10^{-8}$ См/м.

Полученные экспериментальные зависимости $\sigma(t)$ для указанных выше температур изотермической выдержки стекла с хорошей достоверностью аппроксимируются полиномом второй степени $at^2 + bt + c$ [6].

Для всех случаев непрерывного пропускания тока коэффициенты $a > 0$, а $b < 0$, и рассматриваемые зависимости имеют монотонно убывающий характер. При знакопеременном пропускании тока через стекло наоборот: $a < 0$, а $b > 0$, и проводимость от времени отжига монотонно возрастает. Используя уравнения аппроксимации полученных зависимостей, определены времена отжига, при которых проводимость со временем больше не изменяется. Это означает, что структура стекла приходит в равновесное состояние. Для этого, дифференцируя эти уравнения по времени и минимизируя, получим соотношение в виде $d\sigma(t)/dt = 2at - b = 0$, откуда $t = b/2a$.

Таким образом, подставляя в последнее значения коэффициентов a и b из уравнений аппроксимаций, получим время установления равновесия в структуре стекол С87–2, С78–4, С78–5, в зависимости от температуры отжига.

Как видно из рис. 1, время установления равновесия в структуре стекла сильно зависит от температуры отжига, и эта зависимость аппроксимируются уравнениями для стекол:

$$t = 51,408 \exp(-0,0054T) \text{ для } C87-2,$$

$$t = 79,910 \exp(-0,0058T) \text{ для } C78-4,$$

$$t = 31,409 \exp(-0,0029T) \text{ для } C78-5.$$

Подставляя в эти уравнения значения температуры изотермического отжига, можно найти оптимальное время, необходимое для полной релаксации стекла при данной температуре при постоянном пропускании тока через образец.

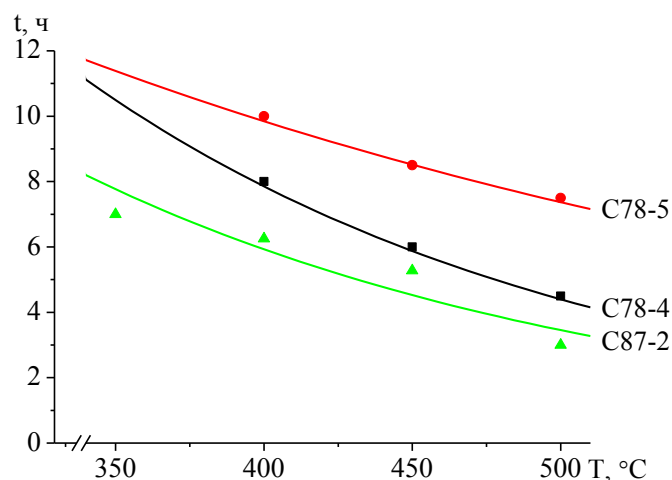


Рис. 1. Зависимость времени достижения фазового равновесия в стеклах от температуры отжига.

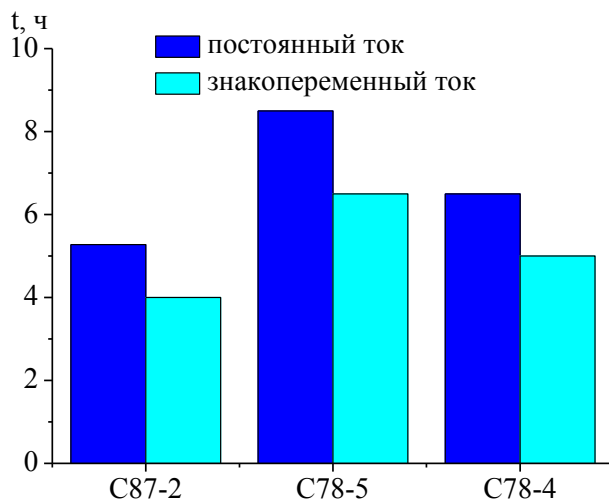


Рис. 2. Диаграмма зависимости времени достижения фазового равновесия в стеклах C87-2, C78-4, C78-5 от электропереноса при температуре 450 °C.

Как видно из рис. 2, время достижения фазового равновесия в стеклах зависит от количества электричества, прошедшего через образец. При постоянном пропускании электрического тока в одном направлении время

достижения фазового равновесия увеличивается на 20–30 %, чем при знакопеременном пропускании электрического тока. Из этого следует, что постоянное пропускание электрического тока (перенос ионов в одном направлении) препятствует образованию новой фазы. Подобные закономерности наблюдаются во всех исследованных стеклах.

В исследуемых стеклах при термических воздействиях происходят фазовые переходы с образованием кристаллических фаз и их последующий рост [6]. Для выяснения влияния этих образований на морфологию поверхности методами сканирующей зондовой микроскопии (СЗМ) были исследованы поверхности стекол.

Анализ топографии проводился атомно-силовой (АСМ) методикой в полуконтактном режиме. Развертка при сканировании была построчной, вдоль оси абсцисс со скоростью 14,26 мкм/с. Частота модуляции зонда составляла 240,095 кГц.

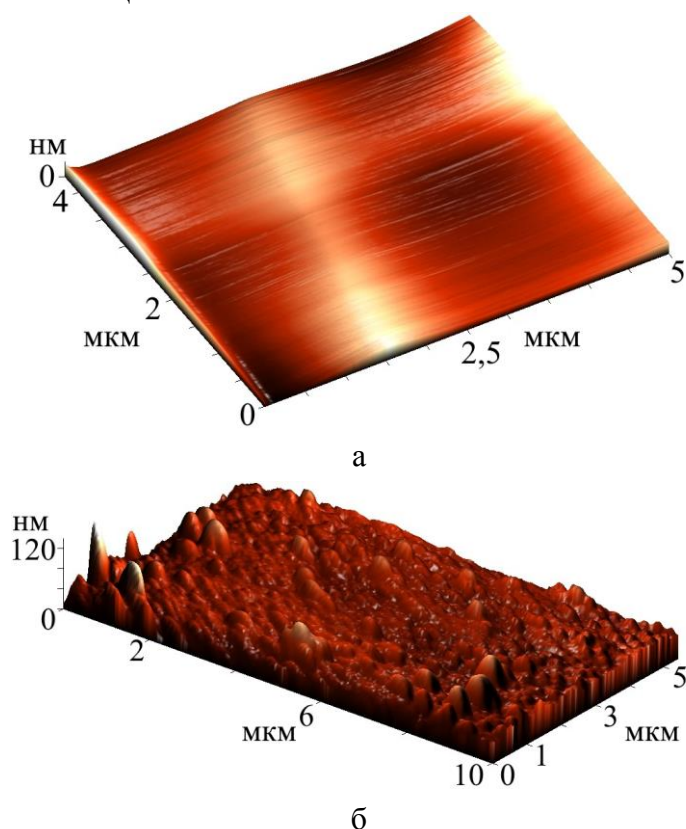


Рис. 3. АСМ изображения: а) поверхности стекла С87–2 непосредственно после разгерметизации вакуумной упаковки. Общая высота рельефа по площади скана 63 нм; б) поверхности стекла С87–2 отожженного в вакууме при измерении электропроводности. Общая высота рельефа по площади скана 140 нм.

Как видно из рис. 3 а, поверхность стекла С87–2 в исходном состоянии весьма гладкая, микрошероховатость этой поверхности порядка ~1 нм. Рельеф поверхности характеризуется небольшими наклонами – около 10 нм на 1 мкм длины [7].

В отличие от этого, после термического и электрического воздействий (см. рис. 3 б), поверхность становится более шероховатой с многочисленными наноразмерными выступами высотой до 50 нм и редкими выступами высотой до 120 нм. Размер этих выступов в основании около 100 и 500 нм, соответственно. Очевидно, эти частицы на поверхности являются отражением процессов фазообразования в объеме стекла.

3. Заключение

Таким образом, постоянное пропускание электрического тока через образец оказывает существенное влияние на структуру и проводимость исследованных стекол. Отжиг в течение пяти часов приводит к равновесному состоянию, стабилизирует структуру и снижает электропроводность стекла, что является принципиально важным для дальнейших перспектив их практического применения.

Библиографический список:

1. **Кулов, С.К.** Микроканальные пластины / С.К. Кулов. – Владикавказ: Северо-Кавказский технологический университет, 2001. – 86 с.
2. **Кулов, С.К.** Мелкоструктурные микроканальные пластины для техники ночного видения / С.К. Кулов, С.А. Кесаев, Е.Н. Макаров и др. // Прикладная физика. – 2006. – № 5. – С. 75-78.
3. **Кармоков, А.М.** Электрофизические свойства специальных стекол электронной техники / А.М. Кармоков, О.А. Молоканов, З.В. Шомахов // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. – 2015. – Вып. 7. – С. 263-269.
4. **Шомахов, З.В.** Электрофизические свойства стекол C87–2, C78–4, C78–5 / З.В. Шомахов, О.А. Молоканов, А.М. Кармоков // Физика и химия стекла. – 2018. – Т. 44. – № 3. – С. 286-289.
5. **Шомахов, З.В.** Электропроводность свинцово-силикатного стекла в процессах нагрева и изотермического отжига / З.В. Шомахов, О.А. Молоканов, А.М. Кармоков // Нано- и микросистемная техника. – 2011. – № 7 (132). С. 14-17.
6. **Кулов, С.К.** Наноразмерные неоднородности на поверхности свинцово-силикатного стекла для МКП / С.К. Кулов, А.М. Кармоков, О.А. Молоканов // Известия РАН. Серия физическая. – 2009. – Т. 73. – № 11. – С. 1649-1651.
7. **Huang, Y.** Nano-scale morphology on micro-channel plate lead silicate glass surface / Y. Huang, Z. Gu, Y. Zhang, H. Liu, G. Li // Journal of the Chinese Ceramic Society. – 2012. – V. 40. – № 7. – P. 994-999.

References:

1. **Kulov, S.K.** Microchannel plates / S.K. Kulov. – Vladikavkaz: Severo-Kavkazskij tekhnologicheskij universitet, 2001. – 86 p. (In Russian).
2. **Kulov, S.K.** The small pore microchannel plate for night vision devices / S.K. Kulov,

- S.A. Kesaev, E.N. Makarov et al. // *Prikladnaya fizika*. – 2006. – № 5. – P. 75-78. (In Russian).
3. **Karmokov, A.M.** The electro-physical properties of a special glass electronic engineering / A.M. Karmokov, O.A. Molokanov, Z.V. Shomakhov // *Physical and chemical aspects of the study of clusters, nanostructures and nanomaterials*. – 2015. – I. 7. – P. 263-269. (In Russian).
4. **Shomakhov, Z.V.** Electrophysical properties of S87–2, S78–4, and S78–5 glass / Z.V. Shomakhov, O.A. Molokanov, A.M. Karmokov // *Glass Physics and Chemistry*. – 2018. – V. 44. – I. 3. – P. 222-224.
5. **Shomakhov, Z.V.** Conductivity of lead-silicate glass in the processes of heating and isothermal annealing / Z.V. Shomakhov, O.A. Molokanov, A.M. Karmokov // *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*. – 2011. – № 7 (132). P. 14-17.
6. **Kulov, S.K.** Nanoscale inhomogeneities on the microchannel plate lead silicate glass surface S.K. Kulov, A.M. Karmokov, O.A. Molokanov // *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*. – 2009. – V. 73. – I. 11. – P. 1549-1551.
7. **Huang, Y.** Nano-scale morphology on micro-channel plate lead silicate glass surface / Y. Huang, Z. Gu, Y. Zhang, H. Liu, G. Li // *Journal of the Chinese Ceramic Society*. – 2012. – V. 40. – № 7. – P. 994-999.

Short communication

ON SPECIAL FEATURES OF STUDYING ELECTRIC CONDUCTIVITY IN SPECIAL ELECTRON OPTICS GLASSES

Z.V. Shomakhov^{1,2}, O.A. Molokanov¹, A.M. Karmokov¹

¹*Kabardino-Balkarian State University named after H.M. Berbekov, Nalchik, Russia*

²*Institute of Applied Mathematics and Automation – branch of the Federal Research Center «Kabardino-Balkarian Scientific Center of the RAS», Nalchik, Russia*

DOI: 10.26456/pcascnn/2019.11.277

Abstract: The laws of the change in the electrophysical properties of the C87–2, C78–4, C78–5 glasses, used in electronic optics are studied. A comparative analysis of the effect of the transmitted electric current on the formation of a new phase and the time to achieve the phase equilibrium in glasses is carried out. It was established that annealing leads to an equilibrium state, stabilizes the structure, and also reduces the electrical conductivity of the glass.

Keywords: microchannel plate, lead-silicate glass, borate-barium glass, electrical conductivity, isothermal annealing, electromass transfer, phase equilibrium.

Шомахов Замир Валериевич – к.ф.-м.н., доцент кафедры электроники и информационных технологий ФГБОУ ВО «Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова», ведущий научный сотрудник отдела вычислительных методов Института прикладной математики и автоматизации филиал ФГБНУ «ФНИЦ «Кабардино-Балкарский научный центр РАН»

Молоканов Олег Артемович – к.т.н., доцент кафедры электроники и информационных технологий ФГБОУ ВО «Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова»

Кармоков Ахмед Мацевич – д.ф.-м.н., профессор кафедры электроники и информационных технологий ФГБОУ ВО «Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова»

Zamir V. Shomakhov – Ph. D., Docent of the Department of Electronics and Information Technology, Kabardino-Balkarian State University named after H.M. Berbekov, Leading Researcher of Department of Computational Methods, Institute of Applied Mathematics and Automation – branch of the Federal Research Center «Kabardino-Balkarian Scientific Center of the RAS»

Oleg A. Molokanov – Ph. D., Docent of the Department of Electronics and Information Technology, Kabardino-Balkarian State University named after H.M. Berbekov

Akhmed M. Karmokov – Dr. Sc., Professor of the Department of Electronics and Information Technology, Kabardino-Balkarian State University named after H.M. Berbekov

Поступила в редакцию/received: 24.10.2019; после рецензирования/reviced: 14.11.2019; принята/accepted 24.11.2019.