



Российская академия наук
Федеральный исследовательский центр проблем химической физики и
медицинской химии РАН
Отдел функциональных материалов для химических источников энергии
Центр водородной энергетики АФК Система
Российская научно-производственная компания Smart-Stat
Малое инновационное предприятие ООО «ПРОМЕТЕЙ РД»
«Научно-консалтинговый центр «Форум-СМ»

Посвящается 30-летнему юбилею Совещаний
Посвящается памяти профессора УКШЕ Евгения Александровича

17-е Совещание с международным участием
«ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ И ПРИКЛАДНЫЕ ПРОБЛЕМЫ
ИОНИКИ ТВЕРДОГО ТЕЛА»

ТРУДЫ СОВЕЩАНИЯ

Московская обл., г. Черноголовка, 16 - 23 июня 2024 г.

У-1-18. ИОНОПРОВОДЯЩИЕ ХАЛЬКОГЕНИДНЫЕ СТЕКЛА С МЕТАЛЛОФИЛЬНЫМИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯМИ

Томаев Владимир Владимирович^{1,2,3}, Тверьянович Ю.С.²,

Луньков С.С.², Зайцева С.А.^{1,2}

¹ Санкт-Петербургский технологический институт (технический университет),
кафедра теоретических основ материаловедения

² Санкт-Петербургский государственный университет, г. Санкт-Петербург

³ Санкт-Петербургский горный университет, г. Санкт-Петербург



Томаев Владимир Владимирович, к.ф.-м.н., доцент, Санкт-Петербургский технологический институт (технический университет), кафедра теоретических основ материаловедения.

Научные интересы, область исследований: Получение, исследование и применение халькогенидных стёкол, а также композитных материалов на основе халькогенидов, оксидов и галогенидов свинца, олова и серебра.

e-mail: tvaza@mail.ru

Гибкая электроника в настоящий момент интенсивно развивается [1]. Это обусловлено не только удобством использования гибких устройств, но и возможностью размещения их (включая различные сенсоры) непосредственно на контролируемых подвижных объектах, например человеческом теле [2,3].

Полупроводниковые материалы, применяемые в настоящий момент в гибкой электронике, могут быть разделены на три основные группы: неорганические нанокристаллические (включая углеродные), неорганические аморфные и органические полупроводники.

Первая группа материалов обладает относительно высокой стабильностью функциональных свойств, но малой гибкостью и пластичностью.

Органические полупроводники достаточно пластичны, но их свойства сравнительно быстро деградируют.

Аморфные полупроводники, представленные в основном аморфным кремнием, занимают промежуточное положение в этом ряду и имеют трудно регулируемые электронные свойства.

Отдельной группой перспективных материалов, используемых в гибкой электронике, могли бы быть пластичные стеклообразные материалы.

Однако стеклообразные материалы, как правило, характеризуются высокой хрупкостью, что обуславливает их низкую устойчивость к механической нагрузке и перепадам температуры. Тем не менее, обнаружено, что халькогенидные стекла с высоким содержанием серебра не только обладают значительной ионной проводимостью по серебру, но и, как было показано ранее [4], демонстрируют повышенную пластичность по сравнению с остальными халькогенидными стеклами.

Последнее связано со способностью атомов серебра к формированию

ненаправленных металлофильных связей при высокой их концентрации в сетке стекла.

С другой стороны известно, что стеклообразные твердые электролиты по сравнению с кристаллическими имеют ряд преимуществ: свойства стекол плавно меняются с изменением состава, как правило, проводимость стекла выше проводимости кристалла того же состава, стекла, как неупорядоченные системы, мало восприимчивы к посторонним примесям, кроме того, современные стекольные технологии позволяют изготовить из стекла изделие практически любой формы и т. д. [5,6].

Тем не менее, известно, что одним из востребованных материалов, для создания гибких сенсоров являются пластичные кристаллические неорганические полупроводники на основе Ag_2S , Ag_2Se , Ag_2Te [7-9], относящиеся к твёрдым электролитам и которые в настоящее время интенсивно исследуются для этих целей.

Обобщая вышесказанное, можно считать, что стеклообразные твердые электролиты способные включать в свой состав без потери стеклообразующей способности не менее 20 мол. % халькогенида серебра могут быть перспективными материалами, применяемыми в гибкой электронике.

Указанные обстоятельства обуславливают интерес к стеклообразным твердым электролитам на основе Ag_2Se .

Ранее, авторами [10-12] проведен анализ температуры стеклования халькогенидных стекол с ионной проводимостью в зависимости от

содержания халькогенидов серебра. В этой работе особенности изменения температуры стеклования стекол на основе халькогенидов серебра объясняются сосуществованием ковалентных связей серебро-халькоген ($\text{Ag}-\text{Ch}$) и металлофильных связей серебро-серебро ($\text{Ag}-\text{Ag}$). Большое количество систем демонстрирует общую взаимосвязь, позволяющую сделать вывод о том, что коэффициент связности серебра в халькогенидных стеклах существенно превышает его формальную степень окисления, поскольку серебро образует металлофильные связи в дополнение к ковалентным.

Ожидая, что металлофильные взаимодействия влияют не только на температуру стеклования, но и на многие другие важные свойства этих стекол, включая механизм ионной проводимости по серебру авторы предполагают дополнить свои исследования измерениями проводимости и выяснить влияние концентрации селенида серебра на проводимость.

Изучено влияние концентрации халькогенида серебра на релаксацию механических напряжений, пластичность стекол, взаимосвязь микротвердости и температуры размягчения стекла, энергию связи атомов серебра, ионную проводимость.

К важным результатам, помимо роста ионной проводимости стекол при увеличении содержания Ag_2Se , относятся кратное увеличение пластичности и, как следствие, более полная релаксация приложенного механического напряжения.

Благодарности. Работа выполнена при поддержке РФФ, грант № 24-23-00140.

Список литературы

- [1]. Shrivastava K., Ghosale A., Bajpai P.K., Kant T., Dewangan K., Shankar R. // *Microchemical Journal*. 2020. V. 156. 104944. 11p.
- [2]. Zazoum B., Batooh K.M., Khan M.A.A. // *Sensors*. 2022. V. 22. P. 4653. <https://doi.org/10.3390/s22124653/>
- [3]. Chen H., Wei T.-R. Shi, X. // *Materials Lab*. 2023. V. 2. 230008.
- [4]. Tveryanovich Y. S., Fazletdinov T. R., Tverjanovich A. S., Pankin D. V., Smirnov E. V., Tolochko O. V., Panov M. S., Churbanov M. F., Skripachev I. V., Shevelko M. M. // *Chem. Mater.* 2022. V. 34. Iss. 6. P. 2743–2751. <https://doi.org/10.1021/acs.chemmater.1c04312>.
- [5]. Yang D., Shi X.-L., Li M., Nisar M., Mansoor A., Chen S., Chen Y., Li F., Ma H., Liang G. X., Zhang X., Liu W., Fan P., Zheng Z., Chen Z.-G. // *Nature Communications*. 2024. V. 15. P. 923. 11p.
- [6]. Liu Y., Zhang Q., Huang A., Zhang K., Wan S., Chen H., Fu Y., Zuo W., Wang Y., Cao X., Wang L., Lemmer U., Jiang W. // *Nature Communications*. 2024. V. 15. P. 2141. 11p.
- [7]. Wang Y., Yang L., Zheng Y., Wang D., Deng Y. J. // *Appl. Phys.* 2023. V. 133. P. 110901. doi: 10.1063/5.0135663
- [8]. Wang Z., Luo S.-H., Zhang X., Guo S., Li P., Yan S. // *Journal of Non-Crystalline Solids*. 2023. V. 619. P. 122581.
- [9]. Ohtomoto T., Hayashi A., Tatsumisago M., Kawamoto K. // *Electrochemistry*. 2013. V. 81(6). P. 428431.
- [10]. Tveryanovich Yu.S., Fazletdinov T.R., Tverjanovich A.S., Fadin Yu.A., Nikolskii A.B. // *Russian Journal of General Chemistry*. 2020. V. 90. N11. P. 2203–2204.
- [11]. Evarestov R.A., Panin A.I., Tverjanovich Y.S. // *Journal of Computational Chemistry*. 2021. V. 42. Iss. 4. P. 242-247.
- [12]. Tveryanovich Y. S., Fazletdinov T. R., Tverjanovich A. S., Pankin D. V., Smirnov E. V., Tolochko O. V., Panov M. S., Churbanov M. F., Skripachev I. V., Shevelko M. M. // *Chem. Mater.* 2022. V. 34. Iss. 6. P. 2743–2751.

Фундаментальные и прикладные проблемы ионики твердого тела

Принято к печати
Федеральным исследовательским центром проблем
химической физики и медицинской химии РАН

Составители: Писарева А.В., Писарев Р.В., Букин И.Г.

Отпечатано с авторских оригиналов

Формат 60x90/16.
Тираж 150 экз.
Заказ № 1620.

Отпечатано в ООО «Издательский дом «Граница»
Москва, ул. 1905 года, д. 7, стр. 1
Тел.: +7 499 259-88-13, +7 495 971-00-75
E-mail: granica_publish@mail.ru
<http://granicagroup.ru>

УДК 544
ББК 22.333
Ф 947

ISBN 978-5-9933-0507-3