



Оригинальные статьи

Научная статья

УДК 541.138.2

<https://doi.org/10.17308/kcmf.2021.23/3672>**Анодное поведение германида марганца Mn_5Ge_3 в водном растворе сульфата натрия**

И. Л. Ракитянская✉, Д. А. Мясников, А. Б. Шеин

*Пермский государственный национальный исследовательский университет,
Букирева, 15, Пермь 614990, Российская Федерация***Аннотация**

Германиды – интересный класс двухкомпонентных систем, состоящих из металлов и германия. По строению они близки к силицидам металлов, но в то же время имеют ряд характерных свойств. Целью работы являлось установление основных закономерностей кинетики анодного электрохимического поведения германида марганца состава Mn_5Ge_3 в водном растворе Na_2SO_4 .

Электрохимическое поведение германида марганца, полученного методом Чохральского, исследовано методами поляризационных кривых и спектроскопии электрохимического импеданса, а также дополнено данными микроскопических измерений. Аналогичным исследованиям подвергнуты и простые вещества, являющиеся его компонентами: марганец и германий. Установлено, что потенциалоопределяющим компонентом при анодном окислении образца является германий. Процесс пассивации, связанный с образованием на поверхности оксидных плёнок, сопровождается осцилляциями тока, которые появляются вследствие плохой адгезии образующегося оксидного слоя к поверхности, его дефектности и несплошностью. Частично установлен состав оксидного слоя, образующегося в результате поляризации. Установлена зависимость анодного поведения образца от концентрации сульфат ионов: в разбавленных растворах пассивация наступает при более положительных потенциалах, чем в концентрированных. Данный эффект может быть объяснён различным механизмом анодного окисления поверхности в растворах разных концентраций.

Ключевые слова: марганец, германий, германид марганца, оксидные пленки, анодное окисление, импедансная спектроскопия

Благодарности: исследования выполнены при финансовой поддержке Пермского научно-образовательного центра «Рациональное недропользование», 2021 г.

Для цитирования: Ракитянская И. Л., Мясников Д. А., Шеин А. Б., Исследование анодного поведения германида марганца Mn_5Ge_3 в водном растворе сульфата натрия. *Конденсированные среды и межфазные границы*. 2021;23(4): 535–542. <https://doi.org/10.17308/kcmf.2021.23/3672>

For citation: Rakityanskaya I. L., Myasnikov D. A., Shein A. B. Anodic behaviour of manganese germanide Mn_5Ge_3 in sodium sulphate aqueous solution. *Kondensirovannyye sredy i mezhfaznye granitsy = Condensed Matter and Interphases*. 2021;23(4): 535–542. <https://doi.org/10.17308/kcmf.2021.23/3672>

✉ Ракитянская Ирина Леонидовна, e-mail: irisa@yandex.ru

© Ракитянская И. Л., Мясников Д. А., Шеин А. Б., 2021



1. Введение

В современном мире большое внимание уделяется поиску новых материалов, обладающих высокой стойкостью к коррозии в широком спектре агрессивных сред. Такими, в частности, являются силициды переходных металлов [1, 2]. Однако изучение германидов тех же самых металлов, близких к силицидам по строению [3], но не обладающих высокой стойкостью к коррозии, также может оказаться интересным, в первую очередь, с целью выяснения механизма растворения систем, состоящих из нескольких компонентов, сильно отличающихся как по физическим, так и по химическим свойствам.

Марганец является довольно активным элементом, поэтому его металлоподобные соединения, в том числе силициды и германиды, обладают свойствами, отличными от подобных систем триады железа, подробно изученных ранее [4]. Существует массив данных, полученных в результате исследования электрохимических процессов, протекающих на силициде Mn_5Si_3 и моносилициде $MnSi$ марганца в кислых электролитах [5–7]. Меньше исследованы эти же двухкомпонентные системы в щелочных средах [8, 9]. На сегодняшний момент данных о поведении силицидов и германидов марганца в водных растворах с рН, близких к 7, недостаточно, хотя большая часть электролитов в различных отраслях промышленности представляют собой именно нейтральные среды. В публикациях в основном присутствуют данные об электрохимическом и коррозионном поведении силицидов металлов различного состава [10–14], в то время как такие исследования для германидов менее распространены [15, 16].

2. Экспериментальная часть

Объектом исследования являлась двойная металлоподобная система – германид марганца состава Mn_5Ge_3 , полученный методом Чохральского [1]. Образец германида был присоединён к медному проводу серебряносодержащим токопроводящим клеем. Всё тело электрода, за исключением рабочей поверхности, было изолировано с помощью эпоксидного клея. Площадь электроактивной поверхности составляла 0.15 см^2 .

Подготовка поверхности электрода до эксперимента проводилась следующим образом: электрод механически зачищали и полировали наждачной бумагой, последовательно изменяя её зернистость с 1000 до 2500. Подготовленную поверхность обезжиривали 96 % этиловым

спиртом и ополаскивали дистиллированной и деионизированной водой. В качестве электрода сравнения использовался насыщенный хлорид-серебрянный электрод. Вспомогательным электродом служила платина.

Для приготовления растворов электролита использовали деионизированную воду ($R = 18.2 \text{ M}\Omega$), полученную в аквадистилляторе Milli-Q Advantage A10 (Германия), и сухой порошок сульфата натрия марки «х.ч.». Исследования проводились в стандартной электрохимической ячейке ЯСЭ-2. Поляризационные и импедансные измерения проводились на потенциостате-гальваностате Metrohm Autolab PGSTAT302N. Поляризационные кривые снимались в потенциодинамическом режиме при скорости развертки 1 мВ/с и температуре $20 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$.

Диапазон используемых в импедансных измерениях частот $f (\omega/2\pi)$ — от $100\,000 \text{ Гц}$ до 0.05 Гц , амплитуда переменного сигнала 10 мВ . До проведения импедансных измерений электрод выдерживался в растворе при соответствующем потенциале до стабильных значений плотности тока. Для обработки импедансных данных использована программа NOVA 2.1.4.

Исследования проводились в условиях естественной аэрации и стационарной диффузии. Перед началом работы ячейку несколько раз промывали водопроводной, дистиллированной и деионизированной водой. В случае сильного загрязнения ячейки продуктами коррозии её промывали горячей хромовой смесью.

Микроскопические измерения осуществлялись с помощью электронного микроскопа Scanning Electron Microscope HITACHI S-3400N с приставкой для микрорентгеноспектрального анализа BRUKER.

3. Результаты и обсуждение

3.1. Поляризационные измерения

При изучении электрохимического поведения многокомпонентных систем представляется целесообразным также получение сведений об аналогичном поведении простых веществ, являющихся составными компонентами таких систем в аналогичных условиях. Методом поляризационных кривых было проведено сравнительное исследование анодного поведения марганца, германия и германида марганца в 0.5 M растворе Na_2SO_4 (рис. 1).

Растворение германия в сульфате натрия происходит довольно равномерно, без заметных пиков на анодной кривой. С увеличением

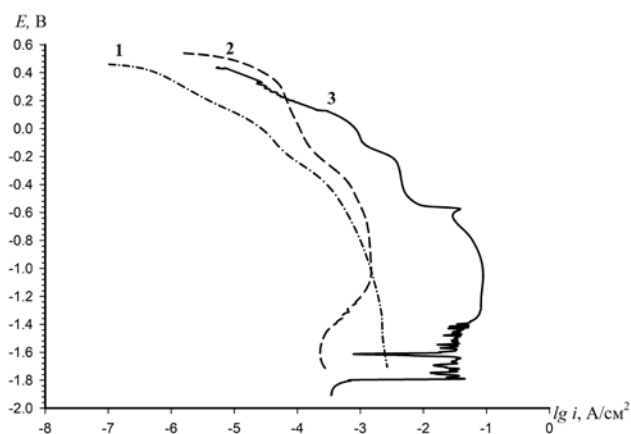


Рис. 1. Поляризационные кривые германида марганца Mn_5Ge_3 и его индивидуальных компонентов в 0.5 М растворе Na_2SO_4 : 1 – Ge; 2 – Mn; 3 – Mn_5Ge_3

анодной поляризации токи увеличиваются, однако скорость возрастания неодинакова на разных участках, что говорит о смене механизма растворения и, возможно, о смене состава продуктов коррозии. Это хорошо согласуется с литературными данными [4, 17], где утверждается, что при анодном растворении германия в водных растворах разного состава может образовываться смесь гидратированных оксидов GeO и GeO_2 , а также метагерманиевая кислота H_2GeO_3 , которые замедляют скорость растворения только в случае накопления достаточно толстого слоя фазового оксида.

Марганец является весьма активным металлом, который при анодной поляризации в водных средах образует множество окисленных форм [18]. Кривая его анодного растворения вполне согласуется с данными диаграммы Пурбе, согласно которой, начиная с потенциала 0.1 В, на поверхности металла последовательно образуются оксиды Mn_3O_4 , Mn_2O_3 и, наконец, при потенциале 0.8 В, оксид MnO_2 , накопление которого замедляет скорость растворения металла. В 0.5 М растворе сульфата натрия скорости растворения чистых германия и марганца сопоставимы.

Германид марганца Mn_5Ge_3 при анодной поляризации демонстрирует высокую скорость коррозии, которая на 1-2 порядка выше, чем для составляющих его чистых компонентов. Потенциалы свободной коррозии для германия и марганца составили $E_{cor} = -0.46$ В и $E_{cor} = -0.56$ В соответственно, при этом для германида марганца фиксируется $E_{cor} = -0.47$ В, что позволяет предположить, что потенциалопределяющим ком-

понентом является германий. Характеристические потенциалы анодной кривой для германида марганца, при которых происходит смена тафелевского наклона, большей частью совпадают с аналогичными потенциалами для поляризационной кривой германия. Последнее позволяет думать, что в данной ситуации особенности анодных процессов на образце обусловлены в основном его неметаллическим компонентом. Однако при глубокой анодной поляризации на кривой Mn_5Ge_3 появляются пики при потенциалах +0.6 В (пик I) и +1.25 В (пик II), не характерные как для Mn, так и для Ge. Более того, при потенциале +1.4 В начинается довольно продолжительная область осцилляций тока, за которой регистрируется спад плотности тока, и, следовательно, происходит замедление процессов растворения.

Концентрация сульфата натрия влияет на процессы, происходящие при анодном растворении образца (рис. 2). При концентрациях выше 0.5 М наблюдается только зависимость скорости растворения от концентрации, потенциал всех пиков активного растворения остаётся постоянным, снижается лишь его ток. С уменьшением концентрации сульфата натрия до 0.25 М и ниже, потенциалы обоих пиков активного растворения сдвигаются в область более положительных значений, что может быть связано с замедлением процесса растворения во времени из-за снижения электропроводности раствора. Кроме того, сульфаты, не участвуя непосредственно в процессе преобразования поверхности, могут являться его активаторами, и, таким образом, снижение их концентрации способно приводить к диффузионным затруднениям.

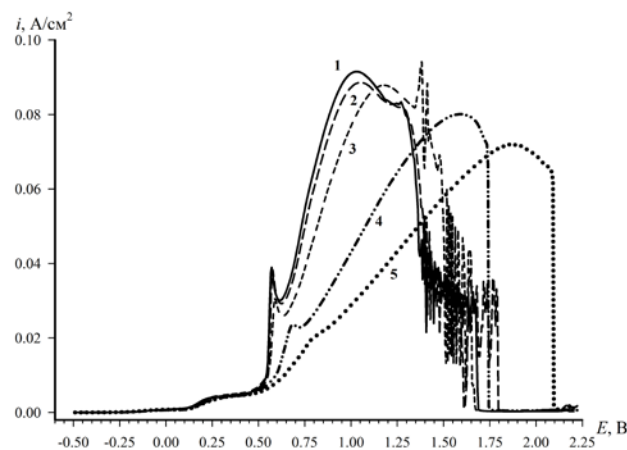


Рис. 2. Анодные поляризационные кривые для германида марганца Mn_5Ge_3 , полученные в растворах Na_2SO_4 различных концентраций: 1 – 1 М; 2 – 0.5 М; 3 – 0.25 М; 4 – 0.1 М; 5 – 0.05 М

Область осцилляций анодного тока также подвержена влиянию концентрации электролита: с увеличением содержания сульфат-ионов она наблюдается при всё менее положительных потенциалах, и её диапазон расширяется.

3.2. Импедансные измерения

На рис. 3 приведены графики Найквиста при соответствующих потенциалах в растворе 0.5 М сульфата натрия. По мере сдвига потенциала в область более положительных значений график принимает вид двух четко разделенных полуокружностей и индуктивной дуги.

В диапазоне потенциалов -0.1 до 0.8 В импеданс системы понижается, затем несколько возрастая в области активно-пассивного перехода. Сложный характер кривой отражает многостадийный характер процесса поляризации:

подобные графики характерны для электродов, отличающихся многообразием адсорбированных продуктов коррозии [19]. Это подтверждает сделанные ранее предположения об образовании на поверхности образца оксидного слоя. На всех спектрах ВЧ-полуокружность отвечает процессам, происходящим на гидратированной оксидной пленке и границе раздела между ней и электролитом, в то время как НЧ-полуокружность характеризует границу раздела оксидная пленка – поверхность электрода.

Появление ВЧ псевдодуги может быть связано с несколькими факторами, в первую очередь, с явлением дисперсии емкости, происходящей из-за особенностей измерительной системы. Зачастую подобные явления возникают из-за недостатков электрода сравнения и конструкции ячейки. В данном случае эта часть спектра явля-

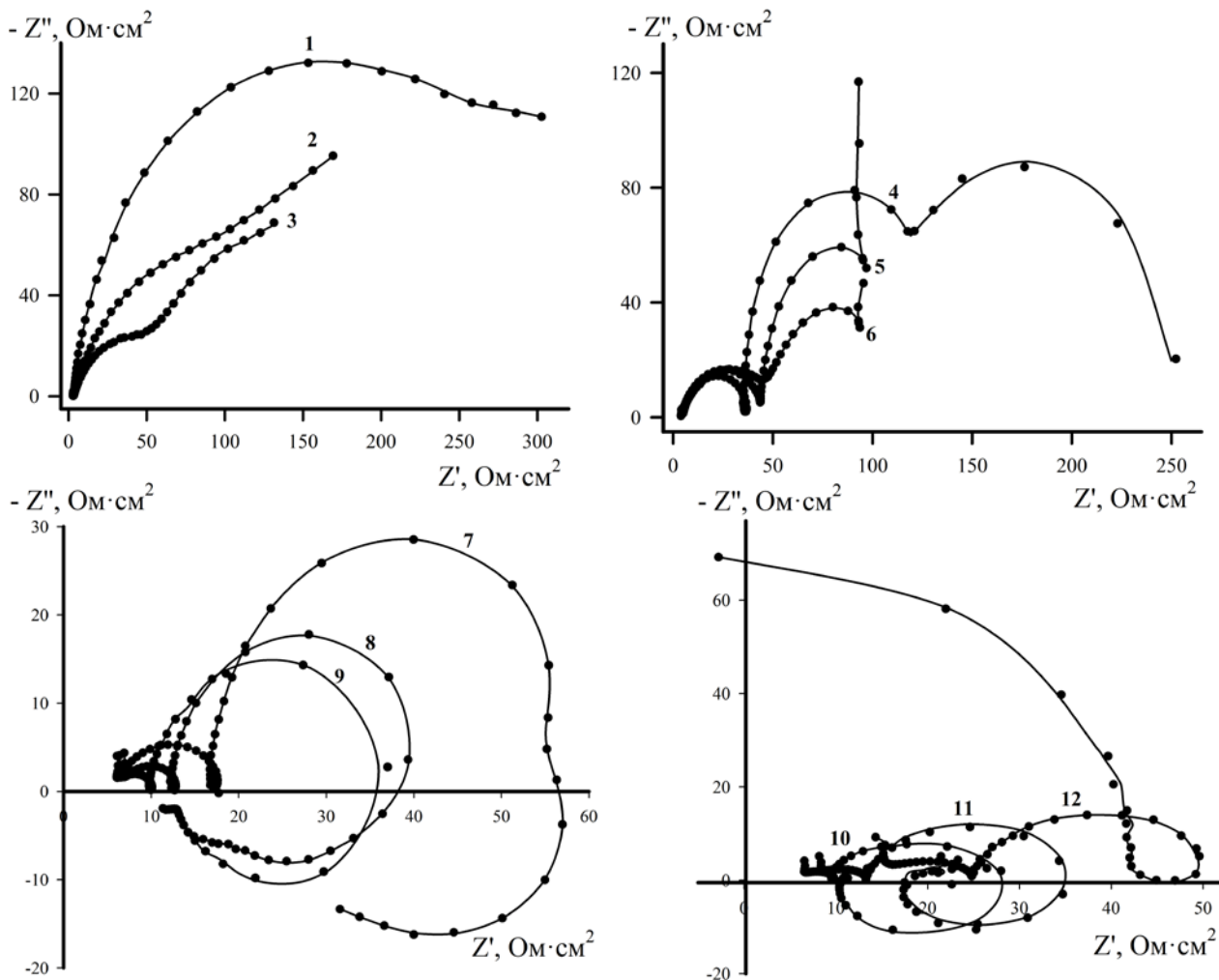


Рис. 3. Графики Найквиста для германида марганца Mn_5Ge_3 в 0.5 М растворе Na_2SO_4 при потенциалах: 1 – -0.1 В; 2 – 0 В; 3 – $+0.1$ В; 4 – $+0.2$ В; 5 – $+0.3$ В; 6 – $+0.4$ В; 7 – $+0.5$ В; 8 – $+0.6$ В; 9 – $+0.7$ В; 10 – $+0.8$ В; 11 – $+0.9$ В; 12 – $+1$ В

ется артефактом, поэтому при анализе спектров она не учитывалась [20, 21].

На всех спектрах импеданса между двумя полуокружностями присутствует постепенно смещающаяся вправо индуктивная петля, которая согласно [22] связана с увеличением шероховатости поверхности и стабилизацией оксидного слоя, содержащего адсорбированные анионы. Шероховатость поверхности предположительно увеличивается благодаря образованию микропор вследствие ускорения диффузии частиц SO_4^{2-} в оксидном слое.

Прямая линия на графике Найквиста получена с помощью схемы Фойта. Все спектры характеризуются двумя положительными временными константами, которые могут оцениваться на достоверность с помощью соотношений Крамера – Кронига. Индуктивная составляющая спектра характеризуется отрицательной временной константой, поэтому эта часть спектра не может оцениваться на достоверность по соотношениям Крамера – Кронига. По мере изменения ампли-

туды переменного сигнала до 5 и 3 мВ графики спектров импеданса не изменяются.

В связи с многостадийностью процесса проведен анализ спектров импеданса по характеристическим частотам f , которые найдены по точкам перегиба на комплексной плоскости. На рис. 4 отображена зависимость характеристических частот от приложенного анодного потенциала.

Частота f_1 , соответствующая первой полуокружности и характеризующая процесс переноса заряда в системе электрод – оксидная пленка, возрастает с повышением потенциала во много раз быстрее, чем частоты f_2 и f_3 , которые соответствуют второй полуокружности и петле индуктивности соответственно. В свою очередь, частоты f_2 и f_3 тоже растут с повышением потенциала до 0.8 В, при котором начинается область активно-пассивного перехода. Рост этих характеристик связан с накоплением толстого слоя труднорастворимых поверхностных соединений, которые затрудняют процесс удаления продуктов

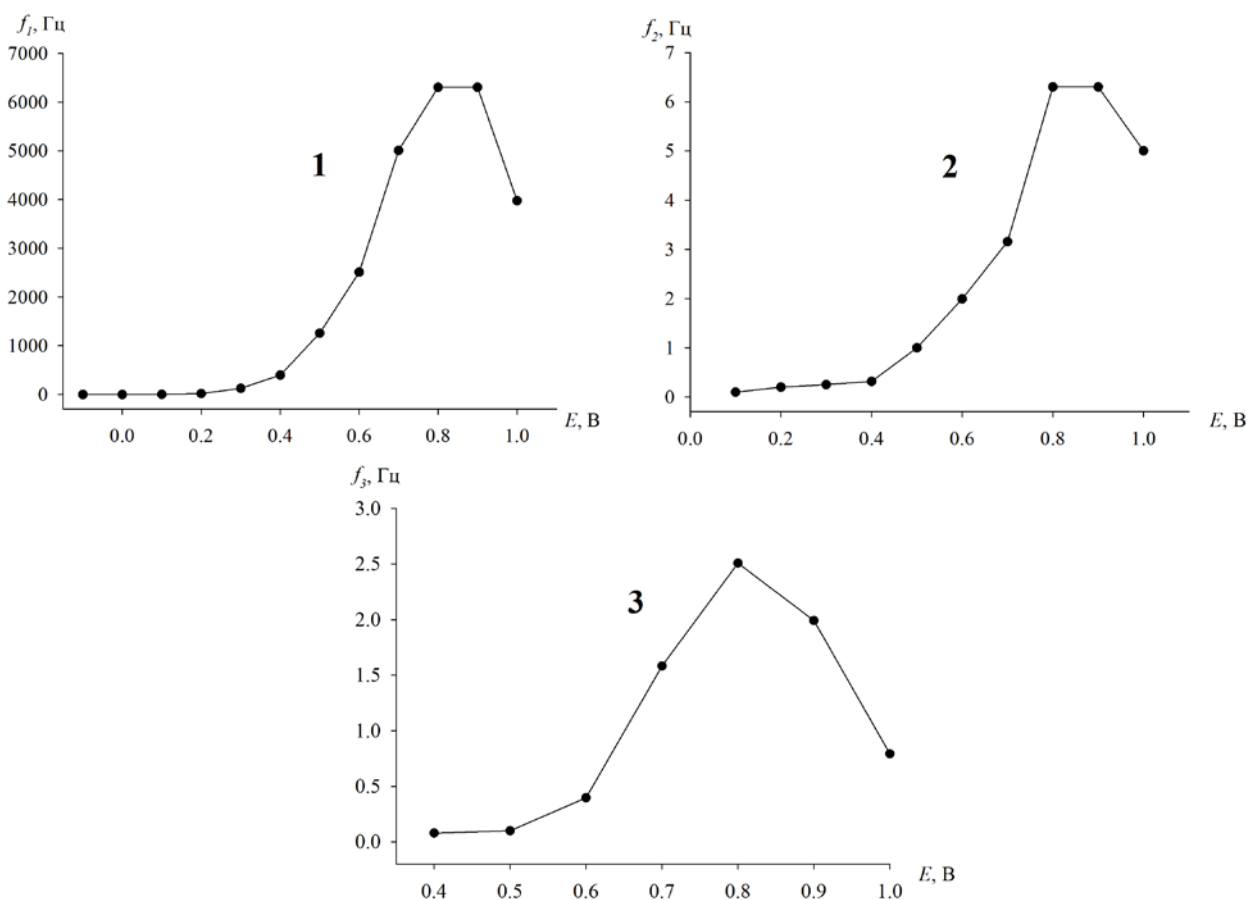


Рис. 4. Характеристические частоты для Mn_5Ge_3 -электрода в 0.5 М растворе Na_2SO_4 при различных анодных потенциалах. 1 – ВЧ-полуокружность, 2 – НЧ-полуокружность, 3 – НЧ-индуктивность

реакции от электрода. При дальнейшем сдвиге потенциала в анодную область эти частоты снижаются вследствие того, что слой образующихся интермедиатов начинает растрескиваться.

Заметнее всего с увеличением потенциала изменяется первая временная константа, характеризующая ВЧ-полуокружность. Диаметры ВЧ- и НЧ-полуокружностей уменьшаются с ростом потенциала, что свидетельствует об увеличении интенсивности процесса окисления. Произведения $i \cdot R$ представлены на рис. 5.

Для ВЧ-полуокружности $i \cdot R$ произведение монотонно возрастает, начиная от $E = 0.4$ В. Для НЧ-полуокружности $i \cdot R$ произведение также возрастает, но более плавно, чем для ВЧ-полуокружности. Это означает, что процесс накопления поверхностной пленки несколько снижает возможную скорость окисления.

3.3. Микроскопические исследования структуры

Для оценки состава и структуры поверхностного слоя после поляризации получены микрофотографии поверхности и проведен микрорентгеноспектральный анализ. При выдерживании электрода в потенциостатическом режиме в течение десяти минут на его поверхности формировался оксидный слой, который в дальнейшем начинал отслаиваться, что особенно заметно при извлечении электрода из раствора электролита.

На микрофотографии, полученной при потенциостатическом выдерживании электрода в области анодного пика при $E = 0.6$ В (рис. 6), можно увидеть морфологию образовавшегося слоя: на электроде присутствуют как свободные от продуктов окисления участки, так и участки

с отслаивающейся пленкой. Рентгеноспектральный микроанализ пленки показал, что она состоит из германия и кислорода в атомном соотношении 1:1. Нужно учитывать то, что гидратированная форма продуктов окисления на воздухе переходит в более стабильные формы оксидов. В связи с этим, микрорентгеноспектральный анализ показал наличие только оксида германия в составе пленки и полное отсутствие марганца.

На микрофотографии, полученной при поляризации до $E = 1.8$ В (рис. 7), хорошо заметна толстая оксидная пленка. По данным микрорентгеноспектрального анализа она также состоит только из оксида германия, однако является более плотной. Оксиды марганца могут образовываться при высоких положительных потенциалах, но с помощью данного метода анализа их обнаружить не удалось.

4. Выводы

Германид марганца весьма нестоек к анодному окислению в растворе сульфата натрия. Механизм анодного растворения включает в себя несколько стадий с адсорбцией промежуточных интермедиатов. Наиболее вероятно, что в нейтральной среде высокая скорость окисления Mn_5Ge_3 связана с равномерным растворением обоих компонентов, но лишь до потенциала -0.45 В. При более глубокой анодной поляризации происходит обеднение поверхностного слоя марганцем из-за его селективного растворения из-под одновременно образующегося слоя оксидов германия. Таким образом, пассивация германида марганца при высоких потенциалах обуславливается неметаллической компонен-

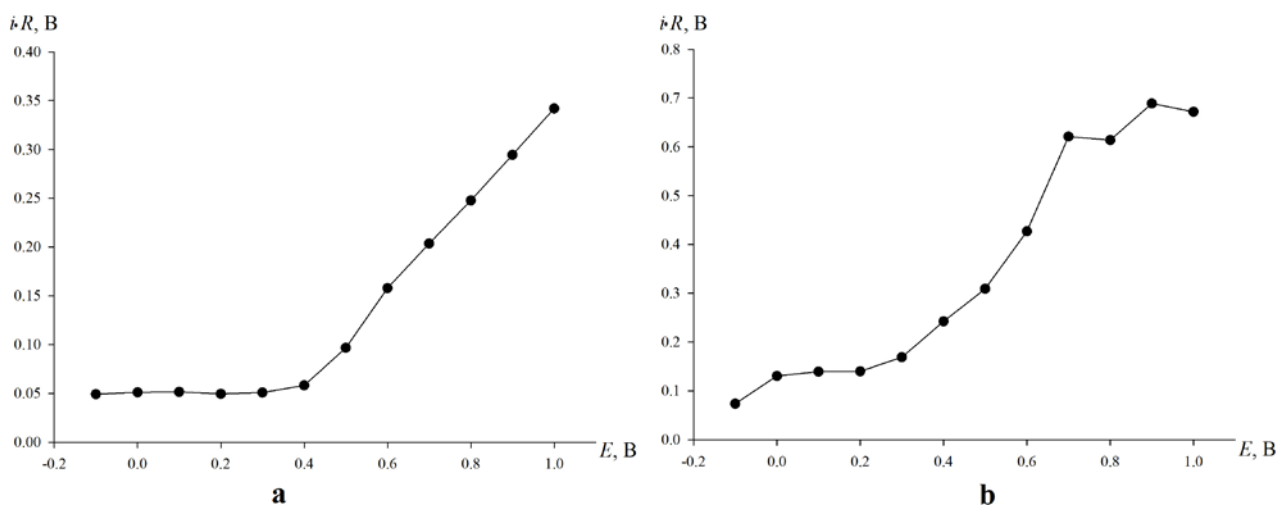


Рис. 5. Зависимость произведения iR от потенциала для Mn_5Ge_3 -электрода в 0.5 М растворе Na_2SO_4 : а – для ВЧ-полуокружности, б – для НЧ-полуокружности

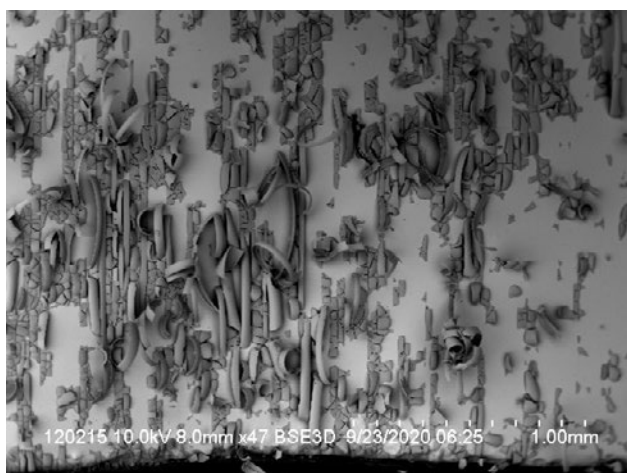


Рис. 6. Микрофотография поверхности Mn_5Ge_3 после анодной поляризации при $E = +0.6$ В в 0.5 М растворе Na_2SO_4 в течение 10 минут

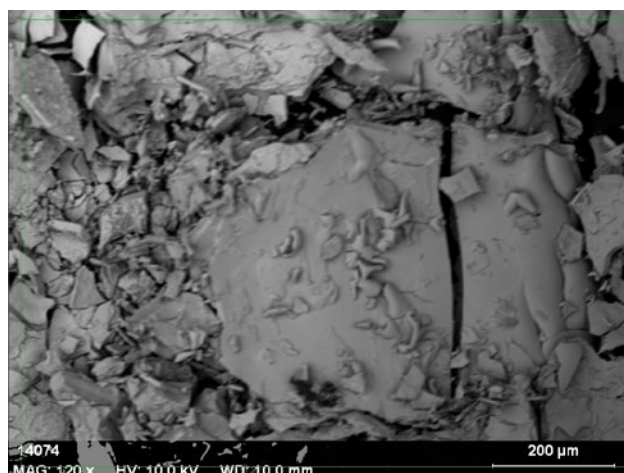


Рис. 7. Микрофотография поверхности Mn_5Ge_3 после анодной поляризации при $E = +1.8$ В в 0.5 М растворе Na_2SO_4 в течение 10 минут

той образца, при этом реакция контролируется диффузией марганца, который селективно ионизируется через продукты окисления германия.

Заявленный вклад авторов

Ракитянская И. Л. – концепция исследования, выбор методик исследования, написание текста, итоговые выводы. Мясников Д. А. – проведение исследования, написание обзора и текста. Шеин А. Б. – общее научное руководство процессом, итоговые выводы.

конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет известных финансовых конфликтов интересов или личных отношений, которые могли бы повлиять на работу, представленную в этой статье.

Список литературы

1. Шеин А. Б. *Электрохимия силицидов и германидов переходных металлов*. Пермь: Перм. гос. ун-т; 2009. 269 с.
2. Shein A. B. Corrosion-electrochemical behavior of iron family silicides in various electrolytes. *Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces*. 2010;46(4): 479–488. <https://doi.org/10.1134/S2070205110040155>
3. Гладышевский Е. И. *Кристаллохимия силицидов и германидов*. М.: Металлургия; 1971. 296 с.
4. Шеин А. Б., Ракитянская И. Л., Вилесов С. П. Влияние состава коррозионной среды на анодное растворение силицидов металлов триады железа. *Известия высших учебных заведений. Серия Химия и химическая технология*. 2010;53(2): 81–83. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=12973914>

5. Окунева Т. Г., Пантелеева В. В., Шеин А. Б. Анодные процессы на Mn_5Si_3 электроде в кислых средах. *Конденсированные среды и межфазные границы*. 2016;18(3): 383–393 <https://journals.vsu.ru/kcmf/article/view/147>
6. Shein A. B., Zubova E. N. Electrochemical behavior of manganese silicides in sulfuric acid solution. *Protection of Metals*. 2005;41(3): 234–242. <https://doi.org/10.1007/s11124-005-0034-z>
7. Полковников И. С., Пантелеева В. В., Шеин А. Б. Импеданс анодных процессов на Mn_5Si_3 -электроде в серноокислом фторидсодержащем электролите. *Вестник Пермского университета. Серия Химия*. 2017;7(3): 250–258. Режим доступа: <http://press.psu.ru/index.php/chem/article/view/834>
8. Полковников И. С., Пантелеева В. В., Шеин А. Б. Анодные процессы на Mn_5Si_3 электроде в щелочном электролите. *Конденсированные среды и межфазные границы*. 2019;21(1): 26–134. <https://doi.org/10.17308/kcmf.2019.21/723>
9. Полковников И. С., Шайдуллина А. Р., Пантелеева В. В., Шеин А. Б. Анодные процессы на моносилициде марганца в растворах гидроксида натрия. *Вестник Пермского университета. Серия Химия*. 2018;8(3): 325–340. <http://dx.doi.org/10.17072/2223-1838-2018-3-325-341>
10. Gonzalez-Rodriguez J. G., Rosales I., Casales M., Serna S., Martinez L. Corrosion performance of molybdenum silicides in acid solutions. *Materials Science and Engineering: A*. 2004;371(1-2): 217–221. <http://doi:10.1016/j.msea.2003.11.041>
11. Chen H., Ma Q., Shao X., Ma J., Huang B. X. Corrosion and microstructure of the metal silicide $(Mo_{1-x}Nb_x)_5Si_3$. *Corrosion Science*. 2013;70: 152–160. <http://doi:10.1016/j.corsci.2013.01.024>

12. Lopez-Sesenes R. Effect of crystallographic orientation on the corrosion behavior of Mo_5Si single crystals in NaCl solution. *International Journal of Electrochemical Science*. 2018;13(5): 4827–4840. <https://doi.org/10.20964/2018.05.31>
13. Pan Y., Wang P., Zhang C.-M. Structure, mechanical, electronic and thermodynamic properties of Mo_5Si_3 from first-principles calculations. *Ceramics International*. 2018;44(11): 12357–12362. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2018.04.023>
14. Wang D., Li P., Kang K., Zhang C., Yin J., Jiang M., Zeng X. Corrosion behaviors of $Cr_{13}Ni_5Si_2$ based composite coatings prepared by laser-induction hybrid cladding. *Surface and Coatings Technology*. 2016;300: 128–134. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2016.05.040>
15. Shein A. B., Aitov R. G. Electrochemical behaviour of eutectic metal-germanium alloys in sulphuric acid. *Electrochimica Acta*. 1991;36(8): 1247–1251. [https://doi.org/10.1016/0013-4686\(91\)80002-p](https://doi.org/10.1016/0013-4686(91)80002-p)
16. Shein A. B. Anodic dissolution of iron and cobalt germanides in an alkaline electrolyte. *Protection of Metals*. 2000;36(4): 344–346. <https://doi.org/10.1007/bf02758505>
17. Тананаев И. В., Шпирт М. Я. *Химия германия*. М.: Химия; 1967. 452 с.
18. Rabe M., Toparli C., Chen Y.-H., Kasian O., Mayrhofer K. J. J., Erbe A. Alkaline manganese electrochemistry studied by in situ and operando spectroscopic methods - metal dissolution, oxide formation and oxygen evolution. *Physical Chemistry Chemical Physics*. 2019;21(20): 10457–10469. <https://doi.org/10.1039/c9cp00911f>
19. Kichigin V. I., Shein A. B. Potentiostatic and impedance spectroscopic studies of the anodic behavior of cobalt silicides in fluoride-containing acidic solutions. *Corrosion Science*. 2019;159: 108–124. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2019.108124>
20. Tran A.-T., Huet F., Ngo K., Rousseau P. Artefacts in electrochemical impedance measurement in electrolytic solutions due to the reference electrode. *Electrochimica Acta*. 2011;56(23): 8034–8039. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2010.12.088>
21. Cruz C., Lima T., Soares M., Freitas E., Fujiwara E., Garcia A., Cheung N. Effect of microstructure features on the corrosion behavior of the Sn-2.1 wt%Mg solder alloy. *Electronic Material Letters*. 2020;16: 276–292. <https://doi.org/10.1007/s13391-020-00202-7>
22. Cui Y.-Y., Bu R.-T., Wang D.-Y., Wang Y.-J. Effects of direct stray current on the performance of cathodic disbonding epoxy powder coatings. *Petroleum Science*. 2019;16: 1417–1429. <https://doi.org/10.1007/s12182-019-00381-5>
23. Ракитянская И. Л., Мозжегорова К. Ю., Ерженков М. В. Анодное поведение силицидо-германидов марганца разного состава в среде 1М NaOH. Вестник Пермского университета. Серия Химия. 2018;8(3): 342–347. Режим доступа: <http://press.psu.ru/index.php/chem/article/view/1517>

Информация об авторах

Ракитянская Ирина Леонидовна, к. х. н., доцент кафедры физической химии, Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь, Российская Федерация; e-mail: irisa@yandex.ru. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-9963-2937>.

Мясников Данил Александрович, магистрант кафедры физической химии, Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь, Российская Федерация; e-mail: bzhendzhishchakevich@mail.ru. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-8889-9580>.

Шеин Анатолий Борисович, д. х. н., профессор, заведующий кафедрой физической химии, Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь, Российская Федерация; e-mail: ashein@psu.ru. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-2102-0436>.

Поступила в редакцию: 06.04.2021; одобрена после рецензирования 30.04.2021; принята к публикации 15.09.2021; опубликована онлайн 25.09.2021.