

УДК 541.138.2

DOI: 10.17072/2223-1838-2020-1-74-83

Д.А. Мясников, И.Л. Ракитянская

Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь, Россия

Анодное поведение силицидо-германида марганца состава $Mn_5Si_{3-2,4}Ge_{2,4}$ в среде раствора Na_2SO_4

Методом циклической вольтамперометрии исследовано анодное поведение трехкомпонентной металлоподобной системы $Mn_5Si_{3-2,4}Ge_{2,4}$ и его отдельных компонентов Mn, Si и Ge в среде раствора сульфата натрия. Установлено, что коррозионная стойкость силицидо-германида марганца значительно ниже, чем отдельных индивидуальных компонентов, однако при существенном сдвиге потенциала в анодную область материал способен пассивироваться, причем пассивация в концентрированных растворах Na_2SO_4 наступает легче и быстрее, нежели в разбавленных. При увеличении скорости развертки потенциала пассивация затрудняется, что связано с определяющей ролью стадии диффузии в формировании защитного слоя.

Ключевые слова: силицидо-германид марганца; анодное поведение; марганец, кремний, германий
коррозионное поведение; сульфат натрия

D.A. Myasnikov, I.L. Rakityanskaya

Perm State University, Perm, Russia

Anodic behavior of manganese silicide-germanide of the composition $Mn_5Si_{3-2,4}Ge_{2,4}$ in a solution of Na_2SO_4

The anodic behavior of the three-component metal-like system $Mn_5Si_{3-2,4}Ge_{2,4}$ and its individual components Mn, Si and Ge in a solution of sodium sulfate was studied by cyclic voltammetry. It was found that the corrosion resistance of manganese silicide-germanide is lower than individual components, however at big anodic potential shifting material passivates and in concentrated Na_2SO_4 solution passivation occurs easier and faster than in diluted one. The increasing of potential sweep leads to the inhibition of passivation process and this effect is dealing with the specifying role of diffusion in the protection layer formation process.

Keywords: manganese silicide-germanide; anode behavior; manganese; silicon; germanium; corrosion
behaviour; sodium sulfate

Введение

Силициды – перспективный класс соединений, обладающих широким спектром полезных свойств: стабильность химического состава, механическая прочность, химическая устойчивость, тугоплавкость и множество других. Поскольку марганец является достаточно важным для современных промышленных производств металлом, изучение свойств его силицидов – интересная и актуальная задача. Исследования анодных процессов в основном проводились для двойных металлоподобных соединений $MnSi$, Mn_5Si_3 , в то время как для тройных металлоподобных систем с общей формулой $Mn_5(Ge_{1-x}Si_x)_3$ данных недостаточно. Замена атомов кремния на близкородственный германий усложняет анодное поведение металлоподобных систем такого рода. Установление основных закономерностей протекания анодных процессов на подобных материалах позволит сделать теоретические предположения об анодном поведении тройных металлоподобных систем в целом.

Анодные процессы на таких системах и их отдельных компонентах изучены достаточно хорошо для кислых и щелочных сред [1–15], в то время как для нейтральных сред данных недостаточно. Было выяснено, что при анодной поляризации в кислых электролитах силициды марганца обладают существенной устойчивостью к растворению вследствие образования на их поверхности пассивных пленок SiO_2 , в то время как германиды такой стойкостью не обладают.

Исследования анодного поведения силицидов в щелочной среде [2–5] показали, что на поверхности возможно образование

силикатов марганца различного состава, способствующих образованию пассивной пленки.

Силицидо-германиды марганца обладают меньшей коррозионной стойкостью, чем силициды марганца, и их поведение имеет качественное сходство с поведением германида марганца. В исследовании [3] было проведено изучение анодного поведения силицидо-германидов различного состава в щелочной среде, где процесс идет в несколько стадий, включающих в себя избирательное растворение компонентов из подрешетки материала с образованием на поверхности электрода смеси малорастворимых оксидов, не плотно адсорбирующихся и не дающих существенной защиты от окисления.

Целью данной работы являлось установление основных закономерностей протекания коррозионно-электрохимических процессов на силицидо-германиде марганца состава $Mn_5Si_{3-2,4}Ge_{2,4}$ в растворе сульфата натрия, а также установление зависимости вида анодных поляризационных кривых от концентрации электролита и скорости развертки потенциала.

Материалы и методика эксперимента

В качестве рабочих электродов использовались образцы из поликристаллических Mn , Si , Ge , а также тройная система состава $Mn_5Si_{3-2,4}Ge_{2,4}$, полученные по методу Чохральского. Базовой установкой для производства образцов послужила печь для промышленного выращивания материалов ОКБ-8093 («Редмет-8»). Образцы предоставлены лабораторией «Кристалл» УГТУ г. Екатеринбург.

Подготовка поверхности электродов до эксперимента проводилась следующим образом: электрод механически зачищали и полировали наждачной бумагой, последовательно изменяя зернистость с 2000 до 2500. Подготовленную поверхность обезжиривали 96 %-ным этиловым спиртом и ополаскивали дистиллированной и деионизированной водой. Перед анодной разверткой потенциала проводилась катодная предподготовка поверхности методом поляризации в катодную область на 200 мВ от потенциала открытой цепи для силицидо-германида и на 150 мВ для индивидуальных компонентов.

Исследования проводились в стандартной электрохимической ячейке ЯСЭ-2. Анодные поляризационные кривые и циклические вольтамперные кривые снимались на потенциостате-гальваностате MetrohmAutolab PGSTAT302N в режиме потенциодинамической развертки в диапазоне скоростей развертки от 1 до 200 мВ/с при температуре $25 \pm 5^\circ\text{C}$ в условиях естественной аэрации и стационарной диффузии. Для очистки ячейки перед началом работы несколько раз промывали водопроводной, дистиллированной и деионизированной водой. В случае сильного загрязнения ячейки продуктами коррозии ее промывали хромовой смесью.

В качестве электрода сравнения использовался хлоридсеребряный электрод, заправленный 4М КСl. В качестве вспомогательного электрода использовалась платина. Все значения потенциала приведены к стандартной водородной шкале.

Для приготовления раствора электролита Na_2SO_4 использовали бидистиллированную

воду ($R=18,2\text{M}\Omega$), полученную в аквадистилляторе Milli-QAdvantage A10 (Германия), и сухой порошок сульфата натрия марки «хч».

Для исследований большую часть образца изолировали с помощью эпоксидного клея, при этом не изолированной оставлялась только рабочая поверхность. К образцу специальным токопроводящим серебрясодержащим клеем припаивался медный провод для обеспечения контакта.

Результаты и их обсуждение

Сравнение анодного поведения силицидо-германида марганца с составляющими его индивидуальными компонентами иллюстрируется рис. 1.

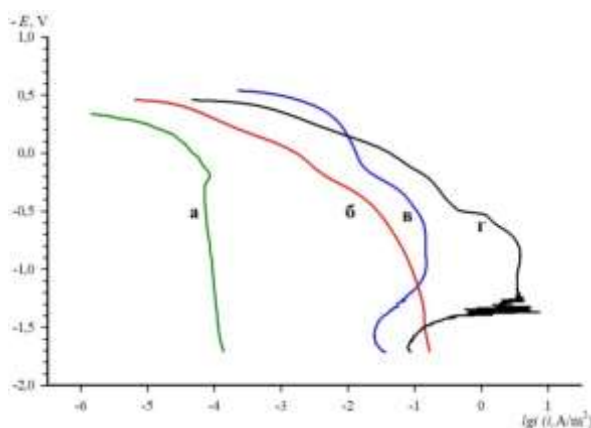


Рис. 1. Анодные поляризационные кривые для а – Si, б – Ge, в – Mn, г – $\text{Mn}_5\text{Si}_{3-2,4}\text{Ge}_{2,4}$ в $0,5\text{M Na}_2\text{SO}_4$

Потенциалы свободной коррозии для индивидуальных компонентов и трехкомпонентного материала представлены в табл. 1.

Таблица 1

Потенциалы свободной коррозии Si, Mn, Ge и $\text{Mn}_5\text{Si}_{3-2,4}\text{Ge}_{2,4}$ в $0,5\text{M Na}_2\text{SO}_4$

Электрод	$E_{кор}$, В
Si	-0,33
Mn	-0,54
Ge	-0,46
$\text{Mn}_5\text{Si}_{3-2,4}\text{Ge}_{2,4}$	-0,46

Можно отметить, что скорость анодного растворения кремния в нейтральной среде довольно мала. При поляризации от потенциала открытой цепи до $E = 0,2$ В наблюдается незначительный рост плотности тока, а затем – некоторое его уменьшение из-за накопления продуктов реакции – оксида кремния SiO_2 , образующего тонкую оксидную пленку, замедляющую растворение, что также подтверждается литературными данными [6–10]. Дальнейшее окисление происходит с гораздо более низкой скоростью.

Германий обладает более высокой скоростью растворения, по сравнению с кремнием. Данная тенденция прослеживается во всей исследованной области потенциалов: начиная от потенциала его свободной коррозии $E = -0,46$ В, и до потенциала $E = 1,70$ В. При этом плотности токов на всем протяжении поляризационной кривой увеличиваются, однако на разных ее участках наклоны оказываются разными, что связано с образованием продуктов окисления GeO и GeO_2 на поверхности германиевого электрода и их дальнейшим растворением вследствие неустойчивости в водных средах [10].

Марганец, начиная переходить в раствор при потенциале $E_{кор} = -0,54$ В, сохраняет рост плотности анодного тока до потенциала $E = 0,60$ В, после чего значение плотности тока выходит на плато. Далее наблюдается снижение величины тока и переход к не слишком протяженной области пассивности, которая заканчивается при потенциале $1,75$ В с началом процесса выделения кислорода. В области потенциалов активного растворения скорость окисления марганца выше, чем скорость растворения кремния и германия, что

коррелирует с данными, полученными в работе [4].

По сравнению со своими индивидуальными компонентами, силицидо-германид марганца растворяется интенсивнее, с довольно высокими значениями плотности анодного тока. Начиная с потенциала свободной коррозии $E_{кор} = -0,46$ В для силицидо-германида регистрируется область активного растворения до потенциала начала пассивации $E = 0,85$ В, после которого значение анодного тока выходит на плато. Дальнейший сдвиг потенциала в анодную область приводит к заметному снижению плотности тока, связанному с тем, что материал начинает пассивироваться. Интересно, что процесс пассивации не идет равномерно: при $E = 1,2$ В начинают наблюдаться осцилляции плотности тока, которые, возможно, связаны с процессом образования пленки из продуктов окисления и отрыва ее от поверхности.

При сравнении анодных поляризационных кривых заметно, что потенциалы свободной коррозии для германия и силицидо-германида марганца имеют одинаковые значения. Можно предположить, что характер анодного растворения материала определяется поведением германия на участке от $-0,46$ до $0,50$ В. После $0,50$ В марганцевый компонент начинает заметно влиять на общий вид кривой. Кремний, как слабо растворяющийся в данных условиях компонент, не вносит значительного вклада в окисление силицидо-германида, однако при этом принимает участие в блокировании поверхности образца продуктами своего окисления.

Более полную информацию о поведении индивидуальных компонентов в среде $0,5\text{M}$

Na_2SO_4 дает метод циклической вольтамперометрии. На рис. 2 представлена циклическая вольтамперная кривая для марганцевого электрода.

Плотности тока кривых прямого хода ступенчато возрастают при анодной поляризации, что характеризует марганец как весьма активный металл с множеством окисленных форм [12, 13]. По мере циклирования плотности тока снижаются вследствие накопления труднорастворимых продуктов окисления марганца на поверхности электрода, однако рисунок хода циклических вольтамперных кривых остается прежним, так как поверхность образца не блокируется полностью продуктами коррозии, и значительная ее часть остается доступной для окисления. При обратной развертке потенциала пиков восстановления, симметричных пикам окисления, не наблюдается, так как процесс окисления марганца носит необратимый характер.

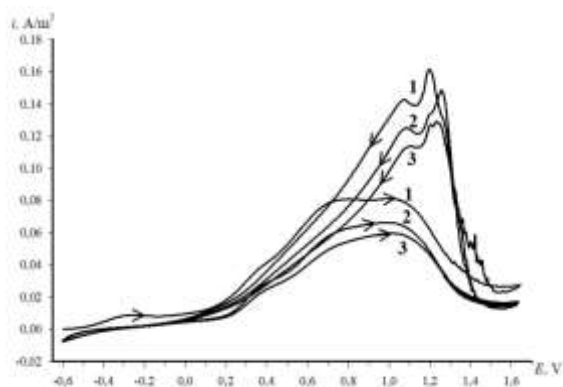


Рис. 2. Циклическая вольтамперная кривая для марганцевого электрода в среде 0,5M Na_2SO_4

При потенциале начала пассивации $E = 1,08$ В идет плавное снижение значения плотности тока, связанное с постепенным увеличением количества окисных пленок на поверхности.

Снижение пика при $E = 0,78$ В на кривых прямого хода после первого цикла свидетельствуют о том, что поверхность постепенно все больше защищается окисными пленками и марганцу сложнее ионизироваться в данной области потенциалов. Марганцевый электрод продолжает растворяться из-под окисного слоя, меняя степень окисления в составе оксидов при дальнейшей анодной поляризации. На кривых при прямой развертке происходит растворение марганца с образованием смеси оксидов, часть из которых труднорастворима. Можно отметить, что поверхность металла остается способной к дальнейшему окислению и при обратной развертке потенциала, благодаря чему ее эффективная площадь оказывается больше.

При потенциале $E = 1,62$ В поверхность марганца пассивируется. На кривых обратного хода видны большие пики плотности тока, связанные с отслаиванием и резким растворением блокирующих поверхность соединений марганца. На кривой обратного хода первого цикла имеется два явно выраженных пика при потенциалах $E = 1,10$ В и $E = 1,25$ В. Токи этих пиков снижаются по мере циклирования. Данные факты свидетельствуют о том, что марганец может образовывать многофазные, наложенные друг на друга окисные пленки, в которых степень окисления марганца может меняться уже после формирования окисного слоя, и которые способны пассивировать поверхность. Процесс образования пассивных пленок носит необратимый характер.

На рис. 3 представлена циклическая вольтамперограмма для германиевого электрода.

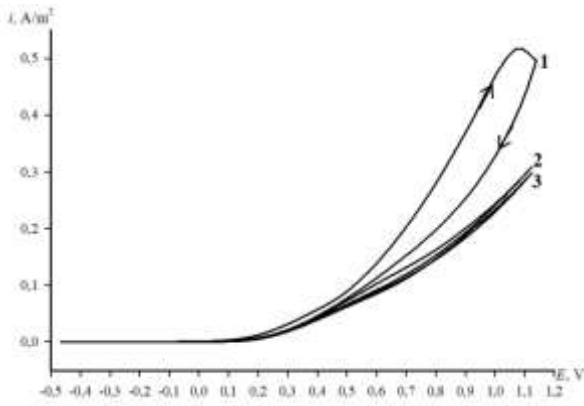


Рис. 3. Циклическая вольтамперная кривая для германиевого электрода в среде 0,5M Na₂SO₄

Германий способен анодно окисляться с образованием труднорастворимых продуктов, которые, между тем, обладают довольно слабыми защитными свойствами вследствие своей неустойчивости [11, 14, 15]. Пиков плотности тока на кривой обратной развертки нет, поэтому можно констатировать, что процесс носит выраженный необратимый характер. Для германия характерны более низкие анодные плотности токов растворения, чем для марганца.

Методом циклической вольтамперометрии было изучено анодное поведение системы Mn₅Si_{3-2,4}Ge_{2,4} в 0,5MNa₂SO₄ (рис. 4).

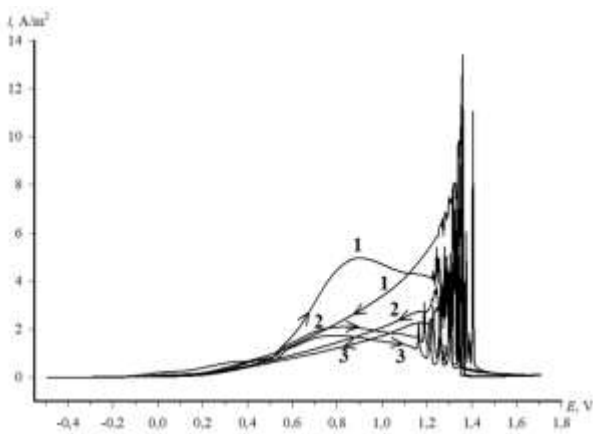


Рис. 4. Циклическая вольтамперная кривая для системы Mn₅Si_{3-2,4}Ge_{2,4} в 0,5MNa₂SO₄

Материал начинает растворяться с $E = -0,46$ В, и до $E = 0,48$ В растворение идет с относительно невысокой скоростью. При $E = 0,48$ В резко возрастает плотность тока, и максимальное ее значение фиксируется при $E = 0,90$ В. Далее, вследствие накопления продуктов анодного окисления на электроде, значение тока начинает снижаться, и при $E = 1,44$ В происходит пассивация образца. Процесс перехода в пассивное состояние сопровождается осцилляциями плотности тока, свидетельствующими о сменяющих друг друга процессах образования и растворения оксидов на поверхности, что является особенностью формирования многофазных оксидных пленок, в которых степень окисления марганца меняется после образования. Интересно, что при обратной развертке первого цикла также наблюдаются осцилляции тока, более того, токи осцилляций при обратной развертке потенциала становятся выше, очевидно, вследствие большей развитости поверхности образца. На втором и третьем циклах прямой развертки существенно снижается плотность тока, что указывает на частичное закрытие поверхности образца и постепенное затруднение растворения силицидо-германида. Скорее всего, эти процессы связаны с селективным растворением марганца из подрешетки образца. Это, ко всему прочему, подтверждает необратимость и повторяемость от цикла к циклу процессов, происходящих при анодном окислении силицидо-германида марганца. Пленка, образующаяся в результате поляризации, способна пассивировать образец.

Визуально в растворе в процессе эксперимента наблюдается значительное помутнение вследствие образования

взвешенных частиц. Появление коллоидных частиц предположительно связано с тем, что образующаяся пленка из смеси оксидов марганца и оксидов германия обладает плохой адгезией к поверхности, и при выдержке в электролите часть ее отслаивается от электрода и попадает в раствор. Осцилляции анодного тока при переходе к области пассивности также говорят в пользу этой гипотезы.

Существенное влияние на вид анодных поляризационных кривых $Mn_5Si_{3-2,4}Ge_{2,4}$ в среде 0,5M раствора Na_2SO_4 оказывает скорость развертки потенциала, при которой осуществляется эксперимент (рис. 5). При ее повышении общий вид кривой меняется, однако основные закономерности анодного растворения остаются характерными. При увеличении скорости развертки v от 1 до 200 мВ/с происходит увеличение плотности анодного тока окисления примерно на три порядка. Это связано с тем, что с увеличением скорости развертки образующаяся пассивная пленка не успевает качественно сформироваться. Область активного растворения материала сдвигается в сторону более положительных потенциалов, в то время как процесс начала пассивации начинается при все более низких значениях потенциала. Характерные осцилляции плотности тока в процессе пассивации сохраняются, но с увеличением v диапазон их потенциалов сокращается. Эти данные позволяют судить о том, что на стадии активного растворения скорость реакции определяется диффузией.

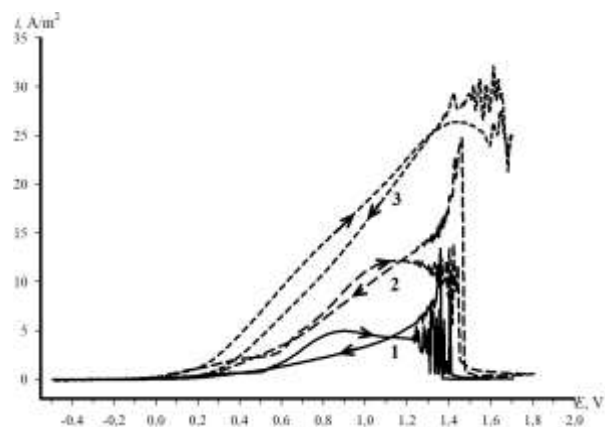


Рис. 5. Первые циклы анодных кривых для $Mn_5Si_{3-2,4}Ge_{2,4}$ в среде 0,5M раствора Na_2SO_4 при скорости развертки 1–1мВ/с, 2–50 мВ/с, 3–200 мВ/с

Также была предпринята попытка установления зависимости электрохимического анодного поведения силицидо-германида от концентрации электролита Na_2SO_4 , в диапазоне следующих значений: 1M, 0,5M, 0,25M, 0,1M, 0,05M. На рис. 6. представлены анодные поляризационные кривые отражающие эту зависимость. В общем случае кривые во всем диапазоне концентраций показывают сложную зависимость плотности тока i , A/m^2 от потенциала E , В. При небольшом сдвиге потенциала в анодную область, до $E = -0,75$ В, скорость растворения силицидо-германида марганца невелика, и практически не зависит от концентрации сульфата натрия. Существенные различия в ходе поляризационной кривой начинаются с потенциала 0,45 В. При невысоких концентрациях электролита (до 0,1M) токи пика анодного растворения увеличиваются, однако эта тенденция меняется при дальнейшем увеличении содержания Na_2SO_4 : начиная с концентрации 0,25M ток пика активного растворения уменьшается, а его потенциал сдвигается в более катодную область.

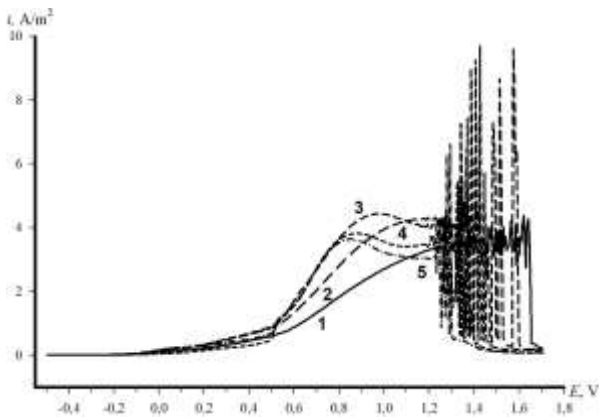


Рис. 6. Анодные поляризационные кривые для $Mn_5Si_{3-2,40}Ge_{2,40}$ в растворах Na_2SO_4 различных концентраций: 1–0,05M, 2–0,1M, 3–0,25M, 4–0,5M, 5–1M

Начало пассивации материала при всех концентрациях сопровождается осцилляциями плотности тока на поляризационной кривой, которые связаны с плохой адгезией оксидной пассивирующей пленки и ее периодическим ростом и отслоением. При увеличении концентрации Na_2SO_4 потенциал начала пассивации сдвигается в область менее положительных потенциалов, а длина участка осцилляций сокращается, и это значит, что более высокие концентрации соли способствуют скорейшей блокировке поверхности материала продуктами коррозии и, как следствие, лучшей ее пассивации.

Заключение

1. Устойчивость к коррозии силицидо-германида марганца состава $Mn_5Si_{3-2,40}Ge_{2,40}$ существенно ниже, чем стойкость отдельных компонентов Mn, Si и Ge.

2. Тройная система $Mn_5Si_{3-2,40}Ge_{2,40}$ при анодном окислении в нейтральной среде способна к пассивации вследствие накопления на поверхности смеси труднорастворимых продуктов, однако система не обладает существенной стойкостью к коррозии.

3. Концентрация электролита Na_2SO_4 влияет на процесс окисления. При анодной поляризации образца пассивация наступает быстрее в более концентрированных (1M Na_2SO_4) растворах и медленнее в разбавленных (0,05M Na_2SO_4).

Библиографический список

1. *Зубова Е.Н.* Коррозионно-электрохимическое поведение силицидов и германидов марганца в кислых электролитах: дис. ... канд. хим. наук. Пермь, 2002. 120 с.
2. *Ракитянская И.Л., Мозжегорова К.Ю., Ерженков М.В.* Анодное поведение силицидо-германидов марганца разного состава в среде 1M NaOH // Вестник Пермского университета. Серия Химия. 2018 Т.8, вып. № 3. С. 342–347
3. *Машиаров М.Т., Утев Н.В., Шеин А.Б.* Импеданс анодных процессов на $MnSi$ -электроде в растворах гидроксида натрия // Вестник Пермского университета. Серия Химия. 2013, вып. № 3. С. 36–44.
4. *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. Т. 21, № 1. С. 126–134.
5. *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. Т. 8, вып. № 3. С. 325–340
6. *Шеин А.Б.* Коррозионно-электрохимическое поведение Mn_5Si_3 , Mn_5Ge_3 и $Mn_5(Ge_{1-x}Si_x)_3$ в сернокислом электролите // Ползуновский вестник. 2009. № 3. 249 с.
7. *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. Т. 18, № 3. С. 383–393.
8. *Шеин А.Б., Зубова Е.Н.* Электрохимическое поведение Mn_5Si_3 и Mn_5Ge_3 в сернокислом электролите // Электрохимия. 2004. Т. 40, № 2. С. 205–210.

9. *Шейн А.Б.* Электрохимия силицидов и германидов переходных металлов / Перм. гос. ун-т. Пермь, 2009. 269 с.
10. *Полковников И.С., Пантелеева В.В., Шейн А.Б.* Импеданс анодных процессов на Mn_5Si_3 -электроде в серноокислом фторидсодержащим электролите // Вестник Пермского университета. Серия Химия. 2017. Т.7, вып. № 3. С. 250–258
11. *Тананаев И.В., Шпирт М.Я.* Химия германия. М.: Химия, 1967. 452 с.
12. *Messaoudy B.* Anodic behaviour of manganese in alkaline medium // *Electrochimica Acta*. 2001. Т. 46. P. 2487–2498.
13. *Rabe M., Toparli C., Chen Y.H.* Alkaline manganese electrochemistry studied by in situ and operando spectroscopic methods – metal dissolution, oxide formation and oxygen evolution // *Physical Chemistry Chemical Physics*. 2019. Vol. 21. P. 10457–10469.
14. *Hart A.C.* The corrosion behavior of binary nickel – germanium alloys // *Corrosion Science*. 1972. Vol. 12. P. 137–143.
15. *Zhang, L., Zhang, B., Pan, B., & Wang, C.* Germanium electrochemical study and its CMP application // *Applied Surface Science*. 2017. Vol. 422. P. 247–256.
1. *Zubova E.N.* (2002) Korrozionno-elektrohimicheskoe povedenie silicidov i germanidov marganca v kislyh elektrolitah. [Corrosion-electrochemistry behavior of manganese silicides and germanides in acidic electrolytes] Perm state Univ., Perm. (In Russ)
2. *Rakityanskaya I.L., Mozhegorova K.Yu., Erzhenkov M.V.* (2018) “Anodic behavior of manganese silicide-germanides of different composition in 1M NaOH”, *Bulletin of Perm University. Series Chemistry*. T.8. Vol. no. 3. pp. 342–347 (In Russ)
3. *Masharov M.T., Utev N.V., Shein A.B.* (2013) “The impedance of anode processes at the MnSi electrode in sodium hydroxide solutions”, *Bulletin of Perm University. Series Chemistry*. no. 3. pp. 36–44 (In Russ)
4. *Polkovnikov I.S., Panteleeva V.V., Shein A.B.* (2019) “Anode processes on an Mn_5Si_3 electrode in an alkaline electrolyte”, *Condensed Matter and Interphase Boundaries*. Vol. 21. no. 1. pp. 126–134 (In Russ)
5. *Polkovnikov I.S., Shaydullina A.R., Panteleeva V.V., Shein A.B.* (2018) “Anode processes on manganese monosilicide in sodium hydroxide solutions”, *Bulletin of Perm University. Series Chemistry*. V. 8, no. 3. pp. 325–340 (In Russ)
6. *Shein A.B.* (2009) “Corrosion-electrochemical behavior of Mn_5Si_3 , Mn_5Ge_3 and $Mn_5(Ge_{1-x}Si_x)_3$ in a sulfuric acid electrolyte”, *Polzunovsky Bulletin*. no. 3. p. 249. (In Russ)
7. *Okuneva T.G., Panteleeva V.V., Shein A.B.* (2016) “Anode processes at the Mn_5Si_3 electrode in acidic media” // *Condensed Matter and Interphase Boundaries*. V. 18. no. 3. pp. 383–393 (In Russ)
8. *Shein A.B., Zubova E.N.* (2004) “Electrochemical behavior of Mn_5Si_3 and Mn_5Ge_3 in a sulfuric acid electrolyte”, *Electrochemistry*, V. 40. no. 2. pp. 205–210 (In Russ)
9. *Shein A.B.* *Elektrokhimiya silicidov i germanidov perekhodnykh metallov* [Electrochemistry of silicides and germanides of transition metals] Perm. state Univ., Perm. (In Russ)
10. *Polkovnikov IS, Panteleeva VV, Shein A.B.* (2017) “The impedance of anode processes on an Mn_5Si_3 electrode in a sulfuric acid fluoride-containing electrolyte”, *Bulletin of Perm University. Series Chemistry*. V.7. no. 3. pp. 250–258 (In Russ)
11. *Tananaev I.V., Shpirt M.Y., Himiya germaniya* (1967) [Chemistry of germanium] Moscow. (In Russ)
12. *Messaoudy B.* (2001) “Anodic behavior of manganese in alkaline medium”, *Electrochimica Acta*. T. 46. pp. 2487-2498
13. *Rabe M., Toparli C., Chen Y.H.* (2019) “Alkaline manganese electrochemistry studied by in situ and operando spectroscopic methods - metal dissolution, oxide formation and oxygen evolution”, *Physical Chemistry Chemical Physics*. V.21, pp. 10457-10469
14. *Hart A.C.* (1972) “The corrosion behavior of binary nickel - germanium alloys”, *Corrosion Science*. V. 12, pp. 137–143

15. Zhang, L., Zhang, B., Pan, B., & Wang, C. (2017) "Germanium electrochemical study and its CMP application", Applied Surface Science. V.422. pp. 247–256

Об авторах

Мясников Данил Александрович,
студент
Пермский государственный национальный
исследовательский университет
614990, г. Пермь, ул. Букирева, 15.

Ракитянская Ирина Леонидовна,
кандидат химических наук, доцент
кафедра физической химии
Пермский государственный национальный
исследовательский университет
614990, г. Пермь, ул. Букирева, 15.
irisa@yandex.ru

About authors

Myasnikov Danil Aleksandrovich,
Student
Perm State University
614990, 15, Bukireva st., Perm, Russia

Rakityanskaya Irina Leonidovna,
Candidate of Chemistry, Associate Professor
Department of Physical Chemistry
Perm State University
614990, 15, Bukireva st., Perm, Russia
irisa@yandex.ru

Информация для цитирования:

Мясников Д.А., Ракитянская И.Л. Анодное поведение силицидо-германида марганца состава $Mn_5Si_{3-2.4}Ge_{2.4}$ в среде раствора Na_2SO_4 // Вестник Пермского университета. Серия «Химия». 2020. Т. 10, вып. 1. С. 74–83. DOI: 10.17072/2223-1838-2020-1-74-83.

Miasnikov D.A., Rakitianskaia I.L. Anodnoe povedenie silitsido-germanida margantsa sostava $Mn_5Si_{3-2.4}Ge_{2.4}$ v srede rastvora Na_2SO_4 [Anodic behavior of manganese silicide-germanide of the composition $Mn_5Si_{3-2.4}Ge_{2.4}$ in a solution of Na_2SO_4] // Vestnik Permskogo universiteta. Seriya «Khimiya» = Bulletin of Perm University. Chemistry. 2020. Vol. 10. Issue 1. P. 74–83 (in Russ.). DOI:10.17072/2223-1838-2020-1-74-83.