

# Конденсированные среды и межфазные границы

<https://journals.vsu.ru/kcmf/>

## Оригинальные статьи

Научная статья

УДК 541.138.2

Научная специальность ВАК - 1.4.6. Электрохимия

<https://doi.org/10.17308/kcmf.2025.27/13325>

## Формирование оксидных плёнок на силицидо-германидах марганца различного состава при анодной поляризации в водном растворе сульфата натрия

И. Л. Ракитянская<sup>1✉</sup>, Д. А. Мясников<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ФГАОУ ВО «Пермский государственный национальный исследовательский университет», ул. Букирева, 15, Пермь 614990, Российская Федерация

### Аннотация

**Цель статьи:** Силицидо-германиды марганца, общего формульного состава  $Mn_5(Si,Ge)_3$ , отличающиеся количественным соотношением кремния и германия и имеющие формулы  $Mn_5Si_{2.40}Ge_{0.60}$ ,  $Mn_5Si_{0.60}Ge_{2.40}$  и  $Mn_5Si_{0.15}Ge_{2.85}$ , подвергались анодной поляризации в водном растворе сульфата натрия. Основной целью исследования было определение продуктов их анодного превращения в неокислительной нейтральной среде и выявление закономерностей формирования на их поверхности оксидных плёнок.

**Экспериментальная часть:** Метод циклической вольтамперометрии показал, что процесс анодного окисления не является обратимым. Поляризационные измерения сопровождались последующим контролем изменения состояния поверхности методом электронной микроскопии. Соотношение элементов на поверхности до поляризации образца и в продуктах коррозии определялось методом микрорентгеноспектрального анализа.

**Выводы:** Было установлено, что в процессе анодного превращения для всех материалов доля марганца в образцах уменьшается, доля германия увеличивается, а доля кремния изменяется незначительно. Сделан вывод, что растворение компонентов материала происходит селективно: марганец преимущественно ионизируется из твёрдой фазы германида марганца в раствор, и его содержание на поверхности снижается до незначительных количеств. Кремний же и германий образуют довольно рыхлые оксидные слои, не обладающие хорошей адгезией к твёрдой, обеднённой марганцем поверхности, и не имеющие серьёзного защитного эффекта. Основными продуктами анодного окисления, остающимися на поверхности, являются оксид германия (II) и частично гидратированный оксид германия (IV)  $GeO_2 \cdot xH_2O$ . Оксид кремния также присутствует в продуктах анодного окисления, но в гораздо меньшем количестве, и его недостаточно для защитного эффекта материала.

**Ключевые слова:** силицидо-германид, марганец, германий, оксидные пленки, анодное окисление, сульфат натрия

**Для цитирования:** Ракитянская И., Мясников Д. А. Формирование оксидных плёнок на силицидо-германидах марганца различного состава при анодной поляризации в водном растворе сульфата натрия. Конденсированные среды и межфазные границы. 2025;27(4): 661–668. <https://doi.org/10.17308/kcmf.2025.27/13325>

**For citation:** Rakityanskaya I. L., Myasnikov D. A. Formation of oxide films on manganese silicide-germanides of various compositions during anodic polarization in an aqueous sodium sulfate solution. *Condensed Matter and Interphases*. 2025;27(4): 661–668. <https://doi.org/10.17308/kcmf.2025.27/13325>

✉ Ракитянская Ирина Леонидовна, e-mail: [irisa@yandex.ru](mailto:irisa@yandex.ru)

© Ракитянская И. Л., Мясников Д. А., 2025



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

## 1. Введение

Быстрые темпы развития современных технологий неизбежно диктуют необходимость создания и изучения свойств новых материалов, зачастую представляющих собой сложную композицию компонентов, сильно различающихся по свойствам. В то же время моделирование электрохимического поведения многокомпонентных и многофазных систем – сложная и нетривиальная задача, требующая для её решения комплексного подхода и широкого спектра методов, которые позволяли бы оценивать не только конечное изменение поверхности материала под действием агрессивной среды, но давали бы информацию о кинетике протекания катодных и анодных процессов. Сочетание метода циклической вольтамперометрии, позволяющего судить о скорости и обратимости электродных процессов, с методом электронной микроскопии и микрорентгеноспектрального анализа, дающими возможность наглядно оценить изменения структуры, качественного и количественного состава поверхности материала дают возможность рассмотреть процесс растворения материала с разных точек зрения и составить целостное представление о происходящих на его поверхности изменениях. Силицидо-германиды марганца, имеющие различные соотношения кремния и германия в своём составе, оказываются подходящими объектами для таких исследований, так как их индивидуальные компоненты, марганец, кремний и германий, сильно отличаются друг от друга по своему электрохимическому поведению [1].

Известно, что все составляющие силицидо-германиды марганца индивидуальные компоненты способны к окислению как в кислой, так и в щелочной средах, и при этом они образуют на поверхности образца продукты различной степени термодинамической устойчивости. Так, при окислении марганца возможно образование соединений в различных степенях окисления, ни одно из которых не способно образовать прочную плёнку, обладающую выраженными протекторными свойствами: в кислой среде образуются растворимые соли двухвалентного марганца, а в щелочной среде марганец находится в пассивном состоянии благодаря образованию на поверхности  $Mn(OH)_2$  и, при более высоких потенциалах,  $MnO_2$  [2–5]. Кремний же, благодаря образованию малорастворимого  $SiO_2$ , хорошо защищает поверхность от растворения в кислых средах, в то время как в щелочах его защитные

свойства не столь значительны [2, 6–8]. Германий, несмотря на схожие с кремнием структуру и некоторые химические свойства, не способен к образованию защитных поверхностных соединений ни в одной из изученных ранее сред [2, 10].

Силицидо-германиды марганца представляют собой двухфазные структуры, состоящие из фаз силицида, силицидо-германида и германида марганца, причем количество той или иной фазы варьируется в зависимости от содержания кремния или германия в материале [11].

Известно, что «предельные» по отношению к силицидо-германидам фазы  $Mn_3Si_3$  и  $Mn_5Ge_3$  при анодировании образуют слои продуктов окисления, которые в случае силицида марганца хорошо защищают поверхность образца от дальнего разрушения [9, 12]. В случае же германида марганца образуется дефектный слой продуктов анодного превращения, не способный защитить образец [10, 12]. На сегодняшний день отсутствуют систематические данные о качественном и количественном составе продуктов анодного окисления силицидо-германидов марганца с различным соотношением германия и кремния в нейтральных средах. Тем не менее, данные о влиянии соотношения элементарных кремния и германия, а также образованных в материале фаз, на формирование поверхностных соединений могут быть применены как для моделирования поведения подобных трёхкомпонентных систем металл + два неметалла, так и для практического использования при создании полупроводниковых конструкций.

Целью данной работы является сравнение анодного поведения силицидо-германидов марганца с различным соотношением кремния и германия в образце и анализ изменения микроструктуры поверхности материалов и продуктов их анодного окисления.

## 2. Экспериментальная часть

Силицидо-германиды марганца составов  $Mn_5Si_{3-2.85}Ge_{2.85}$ ,  $Mn_5Si_{3-2.40}Ge_{2.40}$  и  $Mn_5Si_{3-0.60}Ge_{0.60}$ , полученные по методике, описанной в работе [13], подвергались многократной циклической анодной поляризации от потенциала открытой цепи до потенциала термодинамически возможного выделения кислорода с последующим возвратом к исходному потенциалу. Далее поверхность образца исследовалась микроскопически с использованием микрорентгеноспектрального анализа. Методика подготовки образцов и их исследования подробно описаны в работе [13],

15]. Фазовый состав образцов был подтверждён методом рентгеноструктурного анализа [11]. С увеличением доли атомов германия в образце фазовый состав материала изменяется от преимущественного содержания фазы силицида марганца  $Mn_5Si_3$  к преимущественному содержанию фазы германида марганца  $Mn_5Ge_3$ .

### 3. Результаты и обсуждение

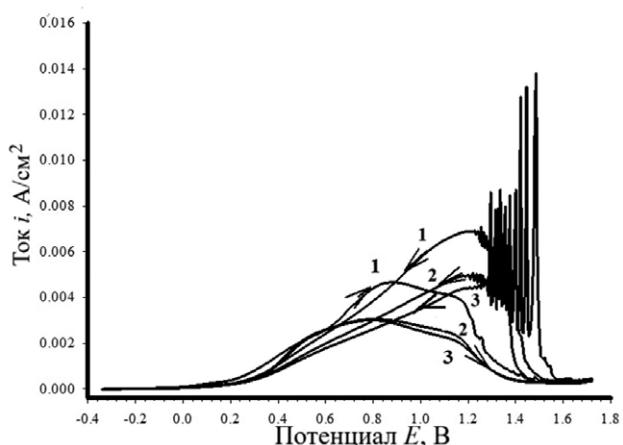
#### 3.1. Поляризационные измерения и данные микроскопического и микрорентгеноспектрального исследований силицидо-германидов марганца

Анодные ЦВА-кривые для  $Mn_5Si_{3-0.60}Ge_{0.60}$  приведены на рис. 1. Начиная от  $E = +0.2$  В, плотность тока начинает заметно увеличиваться, что свидетельствует об активном растворении материала. Однако выделить отдельный максимум на кривой невозможно, пики не разделены, процессы окисления компонентов протекают при близких потенциалах. При потенциале +1.6 В наступает состояние пассивности, процесс активного растворения приостанавливается. Процесс анодного окисления является необратимым, поскольку на кривой обратной развертки также фиксируются пики окисления, сопровождающиеся осцилляциями тока, а пики восстановления отсутствуют. Осцилляции тока обнаруживаются при потенциалах термодинамической возможности выделения кислорода. Можно предположить, что выделяющийся газ способствует отслоению сформированного при прямой развертке оксидного слоя, обладающего слабой адгезией к поверхности материала.

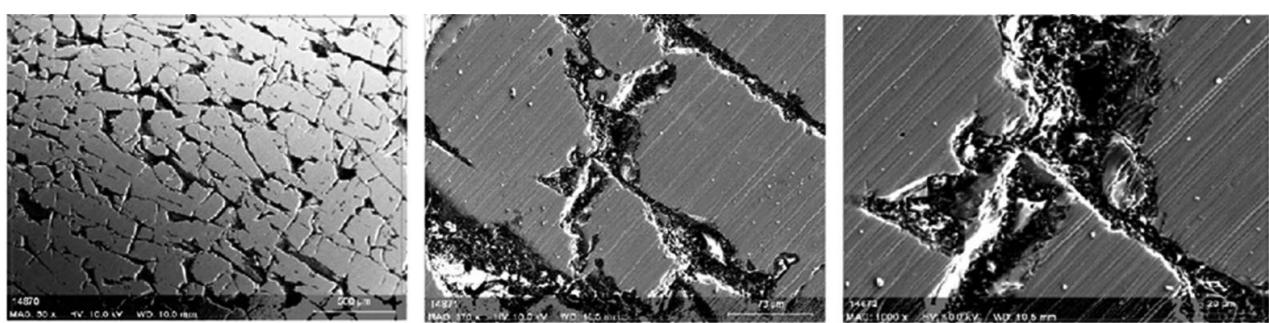
После анодной поляризации на поверхности электрода  $Mn_5Si_{3-0.60}Ge_{0.60}$  видимый слой продуктов превращения отсутствует (рис. 2). При увеличении в 370 и 1000 раз становится заметно, что

наиболее развитыми участками поверхности являются трещины, в которых содержание марганца заметно меньше, чем на гладких участках, а процент германия и кислорода больше. Это позволяет предполагать, что фаза силицида марганца в данной среде устойчива и не подвергается анодному разрушению, в то время как в трещинах происходит превращение германида марганца с ионизацией марганца в раствор и накоплением нерастворимых оксидов германия (табл. 1).

Материал  $Mn_5Si_{3-2.40}Ge_{2.40}$ , содержащий большее количество германия в образце, подвергается разрушению при значительно большей величине анодного тока в области активного растворения по сравнению с  $Mn_5Si_{3-0.60}Ge_{0.60}$  (рис. 3). Процесс также является необратимым, кривые обратного хода для всех циклов лежат выше кривых прямого хода, так как при обратной развертке происходит доокисление компонентов на более развитой поверхности.



**Рис. 1.** Анодные ЦВА-кривые для  $Mn_5Si_{3-0.60}Ge_{0.60}$  в растворе 0.5 М  $Na_2SO_4$ , скорость развертки 5 мВ/с; номер у кривой соответствует номеру цикла



**Рис. 2.** Микрофотографии поверхности  $Mn_5Si_{3-0.60}Ge_{0.60}$  после трёх циклов анодной поляризации в 0.5 М растворе  $Na_2SO_4$  при увеличениях (а) в 50, (б) в 370 и (в) в 1000 раз

**Таблица 1.** Содержание элементов на поверхности  $Mn_5Si_{3-0.60}Ge_{0.60}$  до и после анодной поляризации

	$\omega_{at} Mn, \%$	$\omega_{at} Si, \%$	$\omega_{at} Ge, \%$	$\omega_{at} O, \%$
Поверхность до поляризации	$60.25 \pm 2.55$	$31.24 \pm 1.87$	$6.16 \pm 0.83$	$2.35 \pm 0.51$
На поверхности	$56.85 \pm 2.15$	$34.93 \pm 1.88$	$2.81 \pm 0.54$	$5.41 \pm 0.64$
В трещинах	$15.78 \pm 1.23$	$31.28 \pm 1.87$	$12.83 \pm 1.12$	$40.11 \pm 1.85$

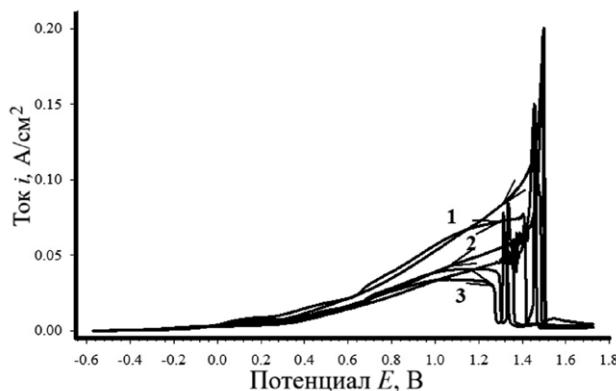
Желто-коричневый оксидный слой, образующийся на силицидо-германиде марганца  $Mn_5Si_{3-2.40}Ge_{2.40}$  в ходе анодной поляризации, хорошо заметен невооруженным глазом. Микроскопическое исследование также показывает наличие хорошо развитого слоя продуктов анодного превращения (рис. 4). Слой не сплошной, рыхлый, легко отделяется от поверхности материала. Неравномерное формирование плёнки приводит к осцилляциям тока на ЦВА-кривых (рис. 3): при отслаивании ток резко возрастает, а затем уменьшается по мере накопления новой порции продукта на поверхности.

Микрорентгеноспектральный анализ поверхности показывает, что после анодной по-

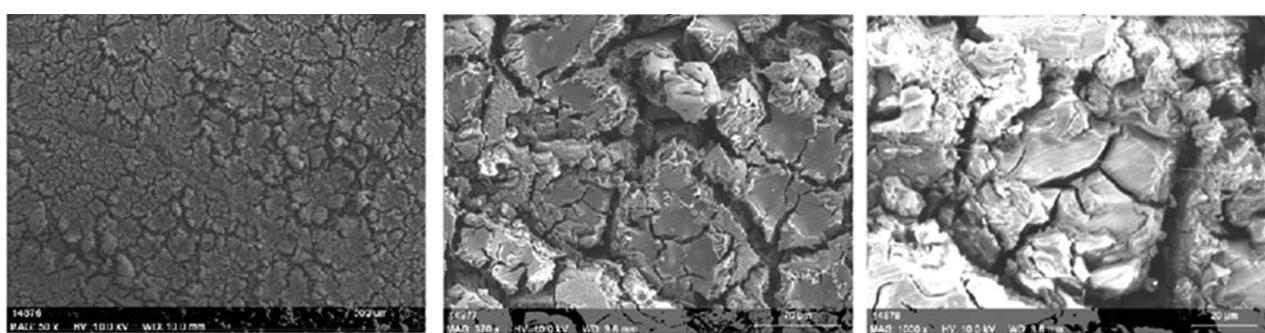
ляризации содержание кремния уменьшается незначительно, процент марганцевого компонента уменьшается, а германиевого увеличивается. Это говорит в пользу того, что фаза силицида марганца по-прежнему устойчива к анодному разрушению, марганец активно выводится в раствор из фазы германида марганца, а германий при этом остаётся на поверхности в виде оксида германия жёлтого цвета сложного состава  $GeO_x$ . В трещинах состав продуктов анодного растворения несколько отличается от такового на поверхности образца в сторону ещё большего обеднения марганцем и обогащением германиевым компонентом.

Образец  $Mn_5Si_{3-2.85}Ge_{2.85}$  на 91 % состоит из фазы германида марганца  $Mn_5Ge_3$ , менее термодинамически устойчивой при анодном окислении в растворах электролитов [11, 14]. В связи с этим, токи в области активного растворения оказываются выше, чем для образцов  $Mn_5Si_{3-0.60}Ge_{0.60}$  и  $Mn_5Si_{3-2.40}Ge_{2.40}$  (рис. 5). Осцилляции, связанные с отслоением продуктов анодного окисления, выражены слабее, на кривой обратного хода фиксируется резкий рост тока при потенциалах возможности активного растворения с последующим снижением. Процесс так же, как и на предыдущих образцах, не является обратимым, симметричный пик восстановления отсутствует.

После анодной поляризации в 0.5 M растворе сульфата натрия на поверхности  $Mn_5Si_{3-2.85}Ge_{2.85}$  так же, как и на поверхности  $Mn_5Si_{3-2.40}Ge_{2.40}$ , хо-



**Рис. 3.** Анодные ЦВА-кривые для  $Mn_5Si_{3-2.40}Ge_{2.40}$  в растворе 0.5 M  $Na_2SO_4$ , скорость развертки 5 мВ/с; номер у кривой соответствует номеру цикла

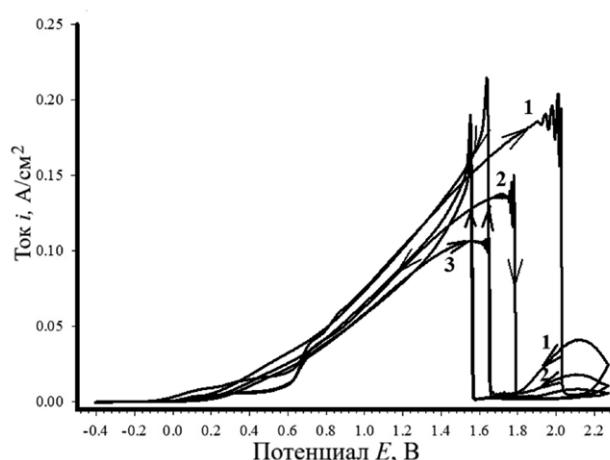


**Рис. 4.** Микрофотографии поверхности  $Mn_5Si_{3-2.40}Ge_{2.40}$  после трёх циклов анодной циклической поляризации в 0.5 M растворе  $Na_2SO_4$  при увеличениях (а) в 50, (б) в 370 и (в) в 1000 раз

орошо заметен желто-коричневый оксидный слой. Микроскопия поверхности показывает, что этот слой оказывается ещё более рыхлым. При увеличении в 2000 раз становятся видны наиболее мелкие части слоя, представляющие собой закрученные в трубки структуры. Размер частиц, из которых состоит оксидный слой, не превышает нескольких десятков микрометров (рис. 6).

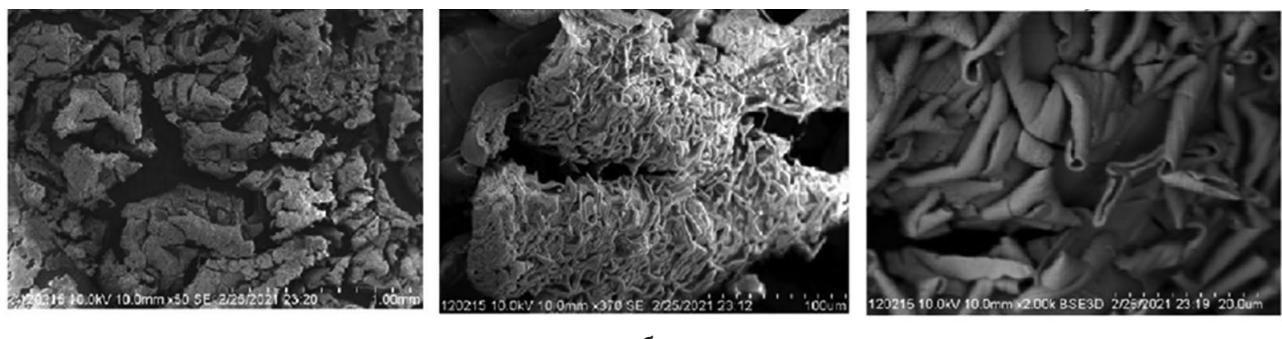
Микрорентгеноспектральный анализ показывает значительное уменьшение содержания марганца и кремния в слое продуктов анодного окисления и одновременное увеличение доли германия и кислорода (табл. 3). Очевидно, менее термодинамически стойкая фаза германида марганца разрушается с переходом марганца в раствор, оставляя на поверхности оксид германия, характеризующийся плохой адгезией к поверхности и, следовательно, низким защитным эффектом.

Высущенный слой продуктов анодного превращения легко отделялся от образца при лёгком постукивании электрода о любую твердую поверхность. Микрофотографии очищенной поверхности представлены на рис. 7. Рельеф поверхности образца  $Mn_5Si_{3-2.85}Ge_{2.85}$  достаточно



**Рис. 5.** ЦВА-кривые для  $Mn_5Si_{3-2.85}Ge_{2.85}$  в растворе 0.5M  $Na_2SO_4$ , скорость развертки 5 мВ/с; номер у кривой соответствует номеру цикла

развит, хорошо заметны места, пораженные коррозией, где происходило селективное вытравливание марганца и образование оксидов, преимущественно оксидов германия. Микрорентгеноспектральный анализ освобождённой от продуктов окисления поверхности показывает её состав, как количественно очень близкий к составу



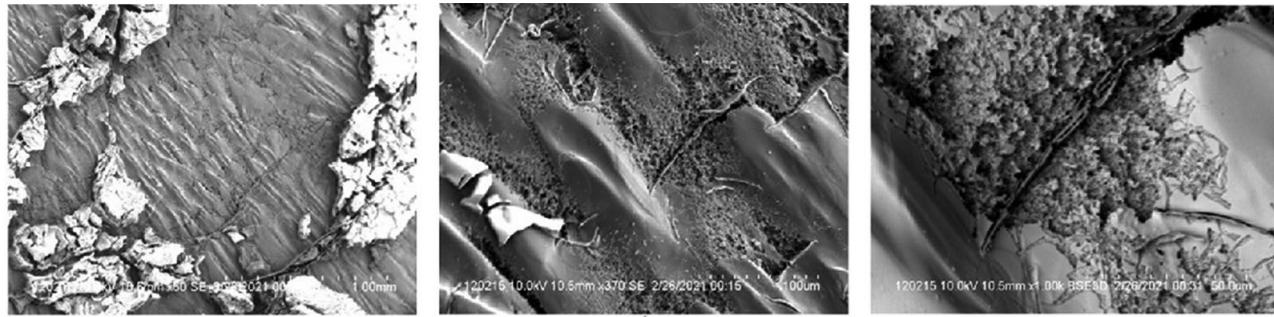
**Рис. 6.** Микрофотографии поверхности  $Mn_5Si_{3-2.85}Ge_{2.85}$  после трёх циклов анодной циклической поляризации в 0.5 M растворе  $Na_2SO_4$  при увеличениях (а) в 50, (б) в 370 и (в) в 2000 раз

**Таблица 2.** Содержание элементов на поверхности  $Mn_5Si_{3-2.40}Ge_{2.40}$  до и после анодной поляризации

	$\omega_{at.}$ Mn, %	$\omega_{at.}$ Si, %	$\omega_{at.}$ Ge, %	$\omega_{at.}$ O, %
Поверхность до поляризации	57.78±2.14	6.16±0.81	30.34±2.03	5.72±0.66
На поверхности продуктов	20.13±1.93	5.97±0.79	47.07±2.12	26.83±1.64
В трещинах	11.79±2.25	5.65±1.79	53.49±3.34	29.07±2.73

**Таблица 3.** Содержание элементов на поверхности  $Mn_5Si_{3-2.85}Ge_{2.85}$

	$\omega_{at.}$ % Mn	$\omega_{at.}$ % Si	$\omega_{at.}$ % Ge	$\omega_{at.}$ % O
Поверхность до поляризации	61.34±2.15	3.27±0.08	30.51±1.75	4.88±0.53
Слой продуктов коррозии	10.17±1.24	2.18±0.12	40.30±2.05	47.35±4.36
Очищенная поверхность	58.53±2.08	4.69±0.12	36.77±2.64	0



а

б

в

**Рис. 7.** Микрофотографии поверхности  $Mn_5Si_{3-2.85}Ge_{2.85}$  после трёх циклов анодной циклической поляризации в 0.5 М растворе  $Na_2SO_4$ , очищенной от продуктов анодного окисления при увеличениях (а) в 50, (б) в 370 и (в) в 2000 раз

поверхности  $Mn_5Si_{3-2.85}Ge_{2.85}$  до анодной поляризации в растворе сульфата натрия (табл. 3.). Небольшое увеличение доли кремния может косвенно свидетельствовать о некотором обогащении поверхности фазой силицида марганца  $Mn_5Si_3$ , в то время как верхний поверхностный слой фазы германида марганца  $Mn_5Ge_3$  полностью подвергся превращению и удалению.

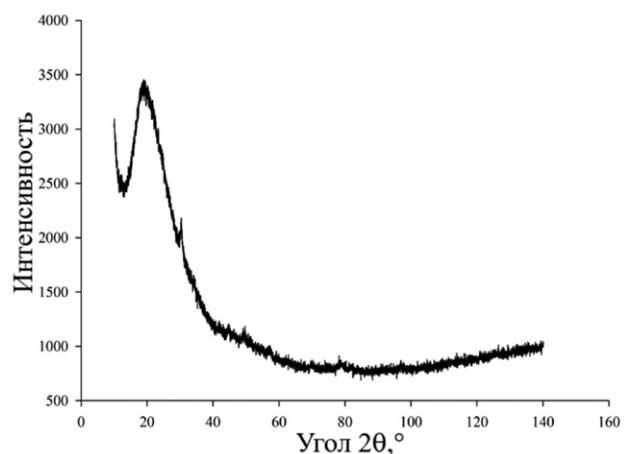
### 3.2. Рентгенофазовый и термический анализ продуктов анодного окисления

Для более точного определения состава продуктов коррозии германийсодержащих фаз были использованы рентгенофазовый и термический методы анализа. В качестве объекта был выбран порошок, отслоившийся с образца  $Mn_5Si_{3-2.85}Ge_{2.85}$  с наивысшим числом атомов германия среди всех исследуемых материалов.

Дифрактограмма удаленных с поверхности образца продуктов анодного окисления приведена на рис. 8. Отсутствие пиков и большое гало на малых углах характерно для наличия большого количества аморфной фазы и отсутствия кристаллитов. Это говорит об аморфности образованного в процессе коррозии оксидного слоя.

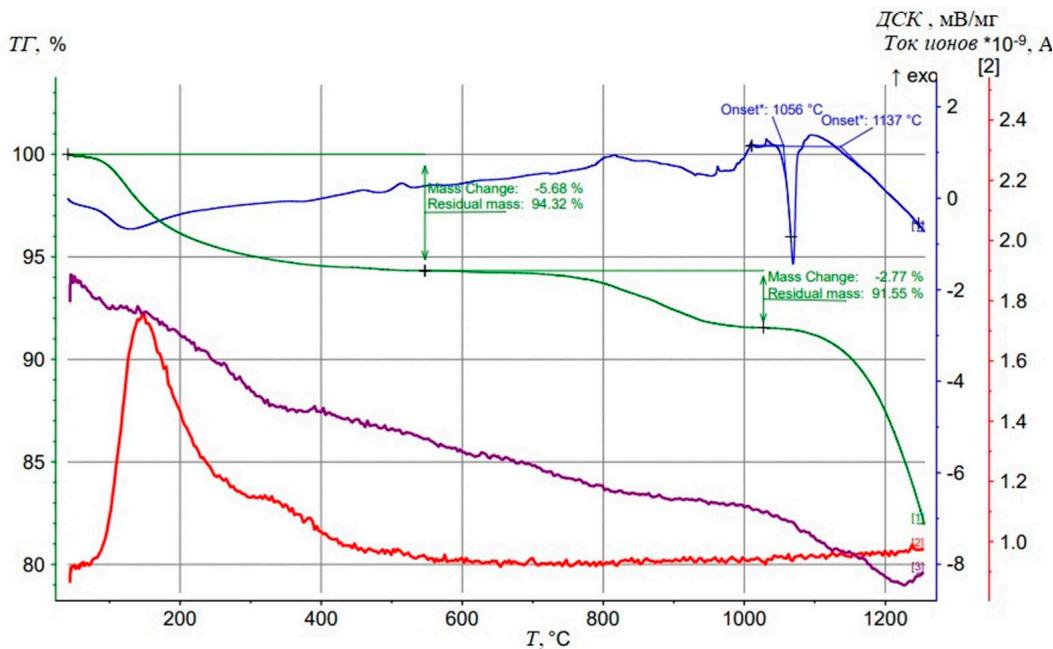
Результаты термического анализа продуктов анодного окисления, термогравиметрическая (ТГ) и дифференциально-сканирующая (ДСК) кривые представлены на рис. 9.

На ТГ кривой хорошо заметны два процесса потери массы в интервале 100–600 °C и 650–1000 °C и начало процесса плавления при 1137 °C. Масс-спектрометрический анализ показал наличие одной молекулы воды в соединении, которая улетучивается при первом процессе потери массы. Второй процесс потери массы отвечает фазовому переходу монооксида германия  $GeO$  в диоксид германия  $GeO_2$ . На ДСК кривой хоро-



**Рис. 8.** Дифрактограмма продуктов анодного окисления  $Mn_5Si_{3-2.85}Ge_{2.85}$

шо заметен пик окисления  $GeO$  до  $GeO_2$  вещества при 1056 °C. Процесс идет с поглощением кислорода, чему соответствуют показания масс-спектрометра. Начало плавления вещества регистрируется при 1137 °C. Учитывая, что плавление диоксида германия – это относительно высокотемпературный процесс, идущий при температурах выше 1137 °C, одновременно с ним может происходить возгонка оксида на поверхность тигля с последующим образованием тугоплавких соединений [16]. После проведения анализа было замечено, что крышка платинового тигля плотно пристала к телу тигля. При отделении крышки на ней можно было заметить тонкую пленку продуктов реакции. Вес тигля также изменялся после проведения термического анализа. Таким образом, продукты коррозии образцов представляют собой преимущественно кислородосодержащие соединения германия. Возможные формулы продуктов анодного окисления:  $GeO$ ,  $GeO_2$  и  $Ge(OH)_x$ .



**Рис. 9.** Кривые термогравиметрии и дифференциально-сканирующей калориметрии для продуктов анодного окисления  $\text{Mn}_5\text{Si}_{3-2.85}\text{Ge}_{2.85}$

#### 4. Заключение

Анализ ЦВА-кривых, микроструктуры поверхности образцов и их элементного состава после анодного окисления показал, что анодное разрушение происходит селективно и преимущественно затрагивает фазу германида марганца. При этом марганец ионизируясь, переходит в раствор, а германий образует на поверхности оксидный слой, содержащий  $\text{GeO}$ ,  $\text{GeO}_2$  и их гидратированную форму  $\text{Ge(OH)}_x$ .

Сравнение изменений состава поверхности показывает, что с увеличением доли германия в силицидо-германидах марганца снижается способность материала сопротивляться анодному окислению. Так, в образце  $\text{Mn}_5\text{Si}_{3-0.60}\text{Ge}_{0.60}$  с высоким содержанием кремния и низким содержанием германия после поляризации доля марганцевого компонента на поверхности уменьшается на 6 %, при этом содержание германия уменьшается вдвое, а доля кремния увеличивается на 12 %. Продукты коррозии, большей частью представляющие собой оксиды германия, скапливаются в трещинах. Видимого невооружённым глазом оксидного слоя на поверхности не обнаруживается. Данный образец содержит преимущественно фазу  $\text{Mn}_5\text{Si}_3$ , устойчивую к анодному окислению в широком спектре агрессивных сред, и его поведение, в том числе отсутствие обильного слоя продуктов, определяется ею.

При снижении доли кремния в образце и увеличении доли германия до состава  $\text{Mn}_5\text{Si}_{3-2.85}\text{Ge}_{2.85}$  суммарное количество продуктов коррозии увеличивается, и они образуют развитый слой структур, напоминающий микротрубки, богатый оксидом германия, который легко удаляется с поверхности. Поскольку этот материал содержит преимущественно фазу  $\text{Mn}_5\text{Ge}_3$ , не демонстрирующую высокую стойкость к анодному разрушению, его поведение близко к поведению индивидуального вещества  $\text{Mn}_5\text{Ge}_3$ . В продуктах коррозии доля марганца снижается более чем на 80 %, кремния на 33 %, а доля германия возрастает на 32 %. Сама поверхность под слоем продуктов при этом также претерпевает изменения: из неё селективно вытравливается марганец, доля которого снижается на 5 %, при этом доля германия увеличивается на 20 %, а кремния на 43 %.

Изменение содержания компонентов в образце промежуточного состава  $\text{Mn}_5\text{Si}_{3-2.40}\text{Ge}_{2.40}$  обусловлено поведением обеих фаз: и  $\text{Mn}_5\text{Si}_3$ , и  $\text{Mn}_5\text{Ge}_3$ . Слой продуктов оказывается достаточно сформированным, но связан с поверхностью прочнее, чем в случае с  $\text{Mn}_5\text{Si}_{3-2.85}\text{Ge}_{2.85}$ . Содержание марганца в продуктах ниже, чем в исходном материале на 65 %, а содержание германия повышается на 55 %. Доля кремния изменяется незначительно. Большая часть продуктов окисления содержится в трещинах, где доля германия оказывается на 76 % выше, чем на исходной поверхности.

Таким образом, активный переход в раствор фазы германида марганца обогащает поверхность образца фазой силицида, более стойкой к анодному окислению.

### Заявленный вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

### 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. Княжева В. М., Бабич С. Г., Колотыркин В. И., Кожевников В. Б. Металлоподобные соединения переходных металлов – новый класс коррозионно-стойких материалов и защитных покрытий. *Защита металлов*. 1991;27(4): 603–616.
2. Takeno N. “Atlas of Eh-pH diagrams,” Geological survey of Japan open file report. 2005. Режим доступа: <https://www.nrc.gov/docs/ML1808/ML18089A638.pdf>
3. Hurlen, T., Våland, T., Electrochemical behaviour of manganese: dissolution, deposition, hydrogen evolution. *Electrochimica Acta*. 1964;9;8: 1077–1085. [https://doi.org/10.1016/0013-4686\(64\)80077-3](https://doi.org/10.1016/0013-4686(64)80077-3)
4. Messaoudy B. Anodic behavior of manganese in alkaline medium. *Electrochimica Acta*. 2001;46: 2487–2498. [https://doi.org/10.1016/S0013-4686\(01\)00449-2](https://doi.org/10.1016/S0013-4686(01)00449-2)
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;8(3): 325–341. <https://doi.org/10.17072/2223-1838-2018-3-325-341>
6. Ефимов Е. А. Об особенностях электрохимического растворения кремния *n*-типа. *Доклады АН СССР*. 1960;130(2): 353–355.
7. Дубровский Л. А., Мельник В. Г., Одынец Л. Л. Анодное окисление кремния в чистой воде. *Журнал физической химии*. 1962;36(10): 2199–2204.
8. Lehmann, V., *Electrochemistry of silicon: instrumentation, science, materials and applications*. Wiley-VCH Verlag GmbH; 2003. 283 p. <https://doi.org/10.1002/3527600272>
9. Zhang X., *Electrochemistry of silicon and its oxide*. Boston: Springer, MA; 2001. 510 p.
10. Zhang, L., Zhang, B., Pan, B., Wang, C. Germanium electrochemical study and its CMP application, *Applied Surface Science*. 2017;422: 247–256. <https://doi.org/10.1016/j.apusc.2017.05.220>
11. Rakityanskaya I. L., Myasnikov D.A. The anodic behavior of manganese silicide-germanides in aqueous sodium sulfate solutions: the effect of the germanium content. *Russian Journal of Electrochemistry*. 2024;60: 623–632. <https://doi.org/10.1134/S1023193524700228>
12. Попов Ю. А. Теория взаимодействия металлов и сплавов с коррозионно-активной средой. М.: Наука, 1995. 200 с.
13. Шеин А. Б. Электрохимия силицидов и германидов переходных металлов. Пермь: Изд-во Пермского гос. ун., 2009. 269 с.
14. Ракитянская И. Л., Мясников Д. А., Шеин А. Б., Анодное поведение 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>
15. 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: 247–252. Режим доступа: [https://journal.altstu.ru/media/f/old2/pv2009\\_03/pdf/247shein.pdf](https://journal.altstu.ru/media/f/old2/pv2009_03/pdf/247shein.pdf)
16. Атабаев И.Г., Хажиев М.У., Матчанов Н.А., Салиев Т.М., Бобожонов К.А. Влияние поверхностных химических обработок на свойства контактов  $Ti-p-Si_{1-x}Ge_x$  и  $Ni-p-Si_{1-x}Ge_x$ . *Физика и техника полупроводников*. 2010;44(12): 1655–1660. Режим доступа: <https://journals.ioffe.ru/articles/viewPDF/7301>

### Информация об авторах

Ракитянская Ирина Леонидовна, к. х. н., доцент кафедры физической химии, Пермский государственный национальный исследовательский университет (Пермь, Российская Федерация).

<https://orcid.org/0000-0001-9963-2937>  
iris@yandex.ru

Мясников Данил Александрович, ассистент кафедры неорганической химии, химической технологии и техносферной безопасности, Пермский государственный национальный исследовательский университет (Пермь, Российская Федерация).

<https://orcid.org/0000-0001-8889-9580>  
bzhdzhishchchakevich@mail.ru

Поступила в редакцию 14.01.2025; одобрена после рецензирования 25.09.2025; принята к публикации 15.10.2025; опубликована онлайн 25.12.2025.