

УДК 544.653.23

DOI: 10.17072/2223-1838-2021-3-202-211

К.В. Шадрин, В.В. Пантелеева, А.Б. Шеин

Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь, Россия

ПАССИВАЦИЯ ДИСИЛИЦИДА ХРОМА В КИСЛЫХ СРЕДАХ

Методами поляризационных, емкостных и импедансных измерений изучено анодное поведение CrSi_2 -электрода в растворах 0,5 М H_2SO_4 , 0,5 М HClO_4 , 0,5 М HNO_3 и 0,5 М HCl . Сделан вывод, что в процессе анодного окисления при потенциалах от E коррозии до E перепассивации включительно на поверхности дисилицида хрома в исследованных средах формируется оксидная пленка, близкая по составу к SiO_2 (с небольшим содержанием оксидов хрома). Присутствие на поверхности силицида данной пленки обуславливает его высокое химическое сопротивление в изученных растворах. Рассчитана толщина оксидной пленки на CrSi_2 в зависимости от потенциала и состава электролита. Определена постоянная роста оксидной пленки.

Ключевые слова: дисилицид хрома CrSi_2 ; анодное окисление; пассивация; кислый электролит; импеданс

Поступила в редакцию 18.08.2021; после доработки 01.09.2021; принята к публикации 06.09.2021

K. V. Shadrin, V. V. Panteleeva, A. B. Shein

Perm State University, Perm, Russia

PASSIVATION OF CHROMIUM DISILICIDE IN ACIDIC MEDIA

The anodic behavior of CrSi_2 electrode in 0,5 M H_2SO_4 , 0,5 M HClO_4 , 0,5 M HNO_3 and 0,5 M HCl solutions has been studied by the methods of polarization, capacitance, and impedance measurements. It has been concluded that in the process of anodic oxidation at potentials from corrosion E to transpassivation E inclusive, an oxide film is formed on the surface of chromium disilicide in the studied media, which is close in composition to SiO_2 (with a small content of chromium oxides). The presence of this film on the silicide surface determines its high chemical resistance in the studied solutions. The thickness of the oxide film on CrSi_2 has been calculated depending on the potential and composition of the electrolyte. The growth constant of the oxide film has been determined.

Keywords: chromium disilicide CrSi_2 , anodic oxidation, passivation, acidic electrolyte, impedance

Received 18.08.2021; revised 01.09.2021; accepted 06.09.2021

© Шадрин К.В., Пантелеева В.В., Шеин А.Б., 2021



Данная статья распространяется на условиях лицензии
[Creative Commons «Attribution» \(«Атрибуция»\) 4.0 Всемирная.](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Силициды переходных металлов представляют собой важный и обширный класс соединений, которые благодаря технически значимым свойствам (жаро-, износо- и коррозионной стойкости, повышенной тепло- и электропроводности, тугоплавкости, твердости, устойчивости к резким многократным теплосменам) находят широкое применение в металлургии, химии, машиностроении, энергетике [1, 2]. Данные соединения и их композиции являются перспективными для изготовления деталей и защитных покрытий, работающих в условиях комплексного воздействия механических нагрузок, высоких температур и агрессивных сред [3–7]. Область применения коррозионно-стойких материалов на основе силицидов переходных металлов может быть расширена, но это требует проведения систематических исследований коррозионно-электрохимических характеристик данных соединений и кинетических закономерностей электродных процессов, протекающих на их поверхности.

Предметом настоящей работы является установление основных закономерностей анодного растворения и пассивации дисилицида хрома (CrSi_2) в растворах 0,5 М H_2SO_4 , 0,5 М HClO_4 , 0,5 М HNO_3 и 0,5 М HCl , определение роли хрома и кремния в кинетике анодных процессов.

Материалы и методика эксперимента

Материалом для исследования служил монокристаллический дисилицид хрома (CrSi_2), полученный методом Бриджмена. Образцы для исследования предоставлены ФГБУН «Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН», г. Санкт-Петербург.

Электрохимические измерения проведены при температуре 20–22 °С в условиях естественной аэрации в неперемешиваемых растворах 0,5 М H_2SO_4 , 0,5 М HClO_4 , 0,5 М HNO_3 и 0,5 М HCl . Для приготовления растворов использовали деионизованную воду (удельное сопротивление воды – 18,2 МОм·см, содержание органического углерода – 4 мкг/л), полученную с помощью системы очистки воды Milli-Q фирмы Millipore (Франция), и реактивы H_2SO_4 , HClO_4 , HNO_3 , HCl марки «х.ч.». Измерения проведены с помощью потенциостата-гальваностата с встроенным частотным анализатором Solartron 1280С фирмы Solartron Analytical (Великобритания) в электрохимической ячейке ЯСЭ-2 с разделенными пористой стеклянной диафрагмой катодным и анодным отделениями. В качестве электрода сравнения использовали насыщенный хлоридсеребряный электрод, в качестве вспомогательного электрода – платиновый электрод. Все потенциалы в работе приведены относительно стандартного водородного электрода.

Перед проведением измерений рабочую поверхность электрода шлифовали абразивными бумагами с последовательным уменьшением размера зерна (марки P1000 и P2000), обезжировали этиловым спиртом, ополаскивали рабочим раствором. После погружения в раствор электрод подвергали катодной поляризации при плотности тока 0,5 мА/см² в течение 10 мин, затем выдерживали при потенциале разомкнутой цепи до установления стационарного значения, далее регистрировали спектры импеданса. Перед измерением спектров импеданса при каждом потенциале проводили потенциостатическую поляризацию электрода до установления практически постоянного значе-

ния тока, после чего начинали измерения импеданса при данном E и более высоких потенциалах, изменяя потенциал с определенным шагом. На основе полученных значений i для данного значения E строили анодные потенциостатические кривые. Диапазон используемых в импедансных измерениях частот f ($\omega/2\pi$) – от 20 кГц до 0,02 Гц, амплитуда переменного сигнала 10–20 мВ.

При электрохимических измерениях и обработке полученных данных использовали программы CorrWare2, ZPlot2, CView2, ZView2 (Scribner Associates, Inc.).

Результаты и их обсуждение

Анодные потенциостатические кривые CrSi₂-электрода в растворах 0,5 М H₂SO₄, 0,5 М HClO₄, 0,5 М HNO₃ и 0,5 М HCl представлены на рис. 1. Поляризационные кривые дисилицида хрома в исследованных растворах имеют слабо выраженную область активного растворения, за которой следуют невыраженный участок активно-пассивного перехода, области пассивного состояния и перепассивации; в растворах 0,5 М HClO₄ и 0,5 М HNO₃ на $\lg i, E$ -кривых области пассивного состояния предшествует участок небольшого снижения плотности тока с потенциалом. Плотность тока растворения CrSi₂-электрода принимает наименьшие значения в растворе 0,5 М HNO₃, имеет близкие величины в растворах 0,5 М H₂SO₄ и 0,5 М HClO₄ и заметно повышается при переходе к раствору 0,5 М HCl. Наибольшее расхождение в величинах плотности тока растворения CrSi₂ в исследованных растворах регистрируется до $E \approx 1,2$ В, при $E > 1,2$ В вольтамперные характеристики силицида сближаются (см. таблицу).

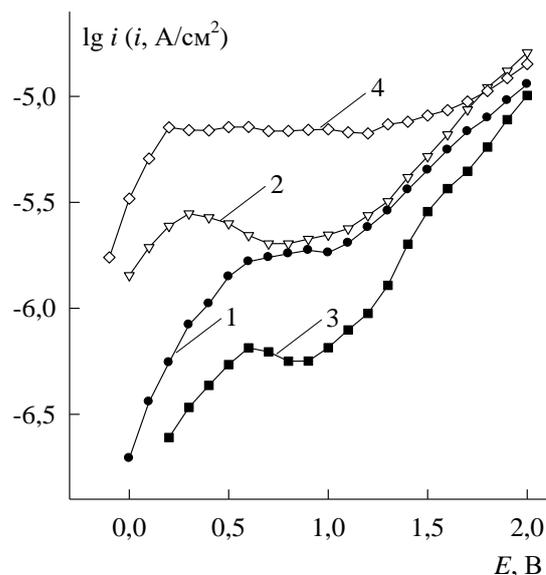


Рис. 1. Анодные потенциостатические кривые CrSi₂-электрода в растворах: 1 – 0,5 М H₂SO₄; 2 – 0,5 М HClO₄; 3 – 0,5 М HNO₃; 4 – 0,5 М HCl

Значения плотности тока растворения CrSi₂-электрода

Раствор	i , мкА/см ²		
	$E = 0,3$ В	$E = 0,9$ В	$E = 1,5$ В
0,5 М H ₂ SO ₄	0,84	1,88	4,49
0,5 М HClO ₄	2,80	2,12	5,21
0,5 М HNO ₃	0,34	0,56	2,86
0,5 М HCl	6,93	6,95	8,12

Дифференциальная емкость CrSi₂-электрода в исследованных растворах при потенциалах от E коррозии до E перепассивации составляет ~3,3–5,3 мкФ/см² и заметно снижается с ростом поляризации (рис. 2). Дифференциальную емкость определяли из значений мнимой составляющей импеданса Z'' при частоте $f = 10$ кГц:

$$C = -\frac{1}{\omega Z''},$$

где ω – круговая частота переменного тока ($\omega = 2\pi f$).

При приближении к области перепассивации на C, E -зависимости регистрируется из-

лом, сопровождающийся повышением емкости с потенциалом до $E \approx 1,3$ В и снижением при $E > 1,3$ В. Следует отметить, что в области $E > 1,3$ В наблюдается более быстрый спад емкости с ростом поляризации по сравнению с областью пассивного состояния силицида.

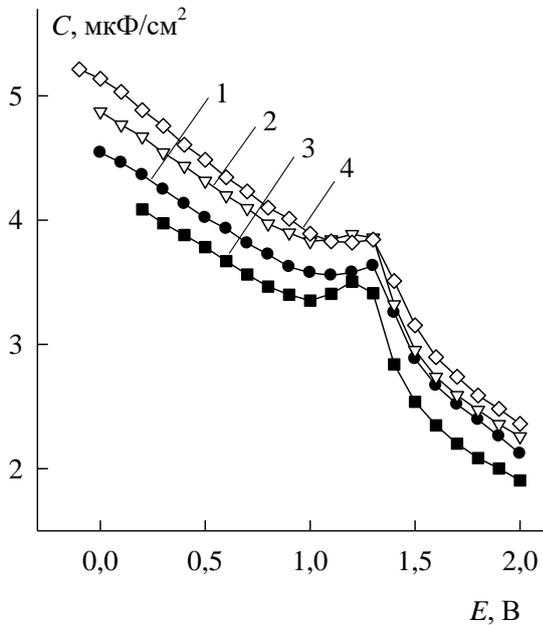


Рис. 2. Зависимость дифференциальной емкости CrSi₂-электрода при частоте 10 кГц от потенциала в растворах: 1 – 0,5 М H₂SO₄; 2 – 0,5 М HClO₄; 3 – 0,5 М HNO₃; 4 – 0,5 М HCl

Низкие значения емкости CrSi₂-электрода при потенциалах, близких к E коррозии, и ее снижение при повышении поляризации, по-видимому, обусловлены формированием на поверхности силицида пассивирующей пленки, состоящей преимущественно из диоксида кремния SiO₂ с небольшим содержанием оксидов хрома, стехиометрия которых зависит от величины электродной поляризации [8, 9]. Оксидная пленка образуется на силициде уже при потенциале коррозии по реакции: $\text{Si} + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{SiO}_2 + 4\text{H}^+ + 4\text{e}^-$, $E^0 = -0,86$ В [10]. Авторами [11–13], исследовавшими термодинамические и кинетические закономерности анодных про-

цессов на силицидах переходных металлов в кислых средах, также показано, что пассивные пленки на силицидах состоят преимущественно из SiO₂ с небольшим содержанием оксидов металлов.

Для электродов, содержащих на поверхности оксидную пленку, дифференциальная емкость на границе электрод/электролит, измеренная при высоких частотах, соответствует емкости оксида. Таким образом, можно заключить, что в области потенциалов линейной зависимости C от E (рис. 2) реализуется процесс послойного роста оксидного слоя, а задержка в изменении значений емкости с потенциалом при $E \approx 1,3$ В и ее дальнейшее снижение связаны с перепассивацией (окисление металлического компонента сплава, сопровождаемое разрушением оксидной пленки, возрастанием дефектности, ослаблением ее изоляционных свойств) и вторичной пассивацией электрода.

По формуле для емкости пленки диэлектрика, которым является анодный оксид на поверхности CrSi₂-электрода:

$$C = \frac{f_r \cdot \epsilon \epsilon_0}{d},$$

были оценены значения толщины d оксидной пленки на силициде в зависимости от E . В формуле: ϵ_0 – электрическая постоянная ($8,85 \cdot 10^{-14}$ Ф/см); ϵ – диэлектрическая проницаемость материала оксидной пленки на поверхности силицида (для расчета d использовали значение $\epsilon(\text{SiO}_2) = 3,8$ [14]); f_r – фактор шероховатости поверхности электрода (принимали равным единице).

Толщина оксидной пленки на поверхности CrSi₂-электрода в области потенциалов от E коррозии до $E \approx 0,9$ В в исследованных растворах линейно зависит от потенциала (рис. 3);

константы анодирования (постоянные роста оксидной пленки), определенные как наклоны данных прямых $K = dd/dE$, составляют 0,20–24 нм/В. Толщина оксидной пленки на силициде при этих значениях E варьирует в диапазоне 0,6–1,0 нм и увеличивается в ряду: 0,5 М НСl < 0,5 М НСlO₄ < 0,5 М Н₂SO₄ < 0,5 М ННО₃.

Невысокие значения рассчитанных величин d и K для CrSi₂-электрода, вероятно, связаны с тем, что при расчетах принимали фактор шероховатости поверхности равным единице, в то время как значение f_r для твердого электрода может изменяться в широких пределах и зависит от предварительной подготовки рабочей поверхности электрода. Использование при расчетах значения ε для чистого SiO₂ также снижает полученные значения d и K . Согласно [15] включение в состав оксида SiO₂ небольших количеств оксидов переходных металлов (образование смешанного оксида Me_xSi_yO_z, где Me – металл) увеличивает диэлектрическую проницаемость материала пленки, что, соответственно, ведет к получению более высоких значений рассчитанных d и K .

Спектры импеданса CrSi₂-электрода в растворах 0,5 М Н₂SO₄, 0,5 М НСlO₄, 0,5 М ННО₃ и 0,5 М НСl в исследованной области потенциалов представлены на рис. 4–7.

В растворе 0,5 М Н₂SO₄ графики импеданса CrSi₂-электрода при потенциалах от E коррозии до $E \approx 0,5$ В состоят из одной емкостной полуокружности со смещенным под действительную ось центром; на графике зависимости фазового угла φ от логарифма частоты переменного тока (графике Боде) полуокружности соответствует симметричный максимум. С увеличением анодной поляризации при этих потенциалах импеданс системы монотонно

снижается в соответствии с ходом поляризационной кривой (рис. 1). В области потенциалов от 0,7 до 1,2 В спектры импеданса представляют собой сочетание емкостной полуокружности со смещенным центром при высоких частотах (ВЧ) и наклонной прямой при низких частотах (НЧ); при $E > 1,3$ В наклон НЧ-прямой на спектрах импеданса составляет $\sim 45^\circ$. С ростом поляризации электрода при E от 0,7 до 1,6 В на графике Боде изменений не наблюдается, модуль импеданса системы снижается.

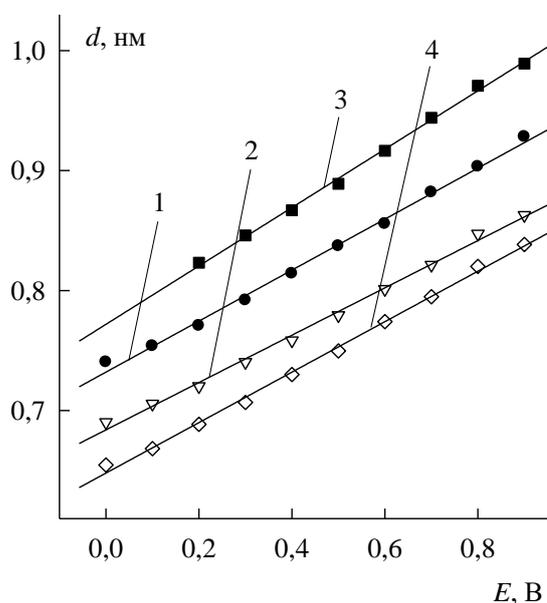


Рис. 3. Зависимость толщины оксидной пленки на CrSi₂-электроде от потенциала в растворах: 1 – 0,5 М Н₂SO₄; 2 – 0,5 М НСlO₄; 3 – 0,5 М ННО₃; 4 – 0,5 М НСl

Графики импеданса CrSi₂-электрода в растворе 0,5 М НСlO₄ при потенциалах от 0 до 1,7 В состоят из одной емкостной полуокружности; на графике Боде в этой области потенциалов регистрируется симметричный максимум. С ростом анодной поляризации при E от 0 до 0,7 В величина импеданса возрастает (на $\lg i, E$ -кривой в данной области ток увеличивается с

потенциалом), при E от 0,9 до 1,7 В отмечается снижение импеданса.

В растворе 0,5 М HNO_3 спектры импеданса дисилицида хрома в области потенциалов от 0,2 до 1,7 В состоят из одной емкостной дуги, которой на $\varphi, \lg f$ -графике соответствует два нерезких максимума. С ростом анодной поляризации при потенциалах от 0,2 до 0,9 В величина импеданса изменяется слабо (несмотря на то, что в начале данной области ток повышается с E), при потенциалах от 1,1 до 1,7 В – уменьшается.

Спектры импеданса CrSi_2 -электрода в растворе 0,5 М HCl при потенциалах от -0,1 до 1,9 В представляют собой емкостную полуокружность; на графике Боде регистрируется несимметричный максимум. С ростом анодной поляризации модуль импеданса системы до $E \approx 0,5$ В изменяется слабо (на поляризационной кривой в данной области ток возрастает с E), при $E > 0,5$ В модуль импеданса системы снижается.

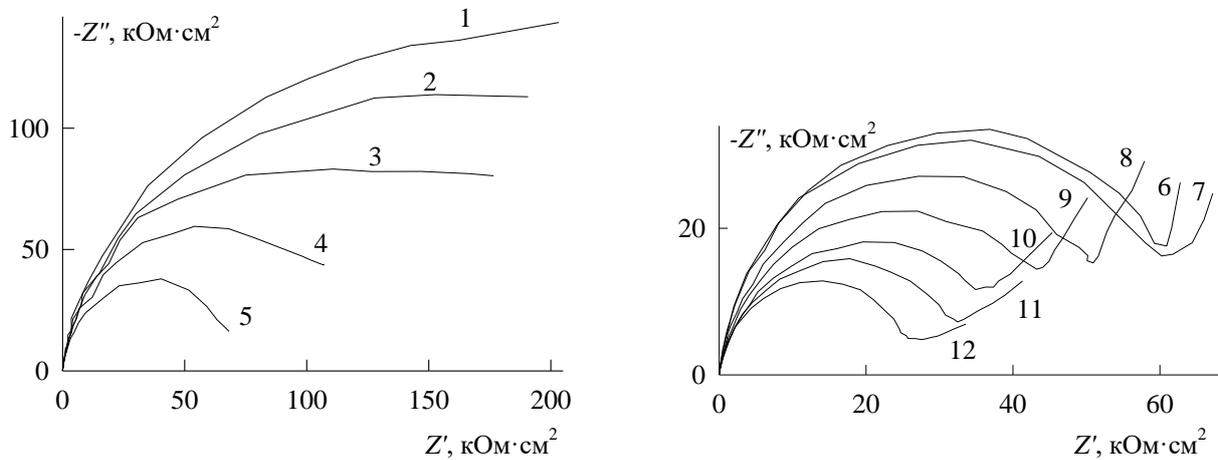


Рис. 4. Спектры импеданса CrSi_2 -электрода в растворе 0,5 М H_2SO_4 при E , В:

1 – 0; 2 – 0,1; 3 – 0,2; 4 – 0,3; 5 – 0,5; 6 – 0,7; 7 – 0,9; 8 – 1,1; 9 – 1,2; 10 – 1,3; 11 – 1,4; 12 – 1,6

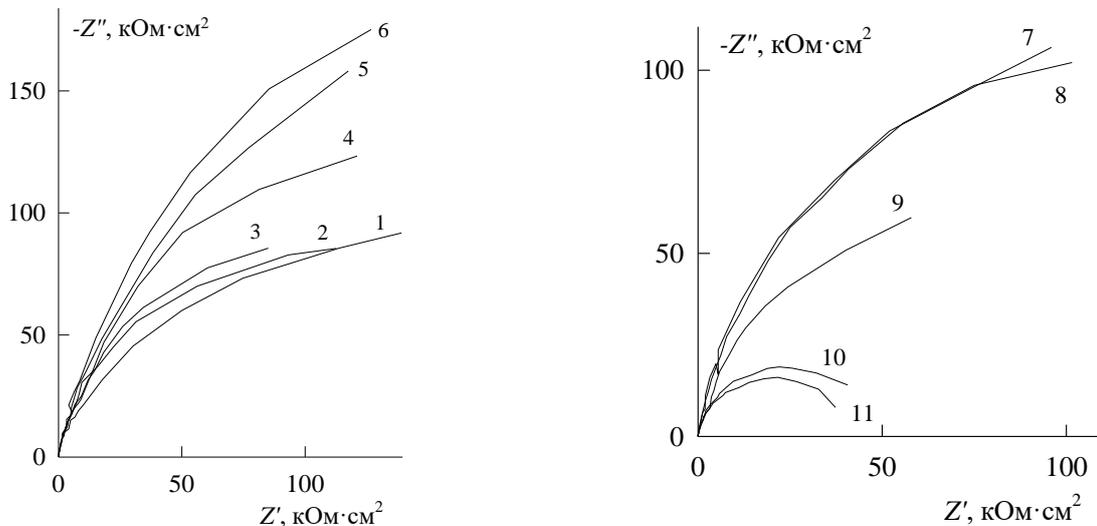


Рис. 5. Спектры импеданса CrSi_2 -электрода в растворе 0,5 М HClO_4 при E , В:

1 – 0; 2 – 0,1; 3 – 0,2; 4 – 0,4; 5 – 0,5; 6 – 0,7; 7 – 0,9; 8 – 1,1; 9 – 1,3; 10 – 1,5; 11 – 1,7

Из частотных зависимостей составляющих импеданса CrSi₂-электрода в исследованных растворах (рис. 4–7) следует, что изучаемые системы во всем исследованном диапазоне потенциалов характеризуются не менее чем двумя временными константами. Временная константа при высоких частотах характеризует процессы релаксации на границе оксидная пленка/электролит (импеданс данной границы в большинстве случаев отвечает малому по

величине сопротивлению [16]); временная константа при низких частотах – процессы релаксации в оксидной пленке. Таким образом, качественные и количественные изменения спектров импеданса CrSi₂ при переходе от одной области потенциалов к другой и при варьировании состава электролита обусловлены преимущественно процессами релаксации в пленке и связаны с ее ростом и структурными изменениями.

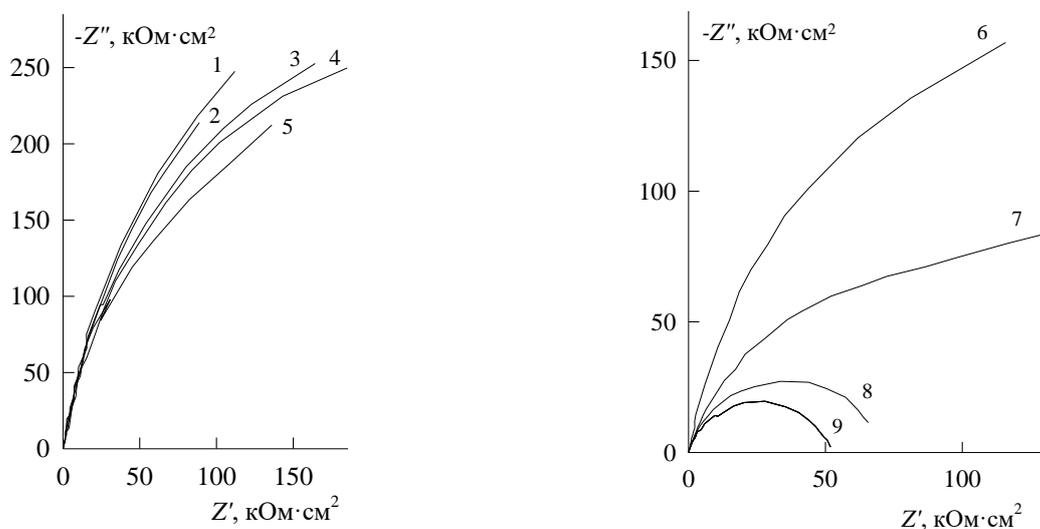


Рис. 6. Спектры импеданса CrSi₂-электрода в растворе 0,5 М HNO₃ при E, В:
1 – 0,2; 2 – 0,3; 3 – 0,5; 4 – 0,7; 5 – 0,9; 6 – 1,1; 7 – 1,3; 8 – 1,5; 9 – 1,7

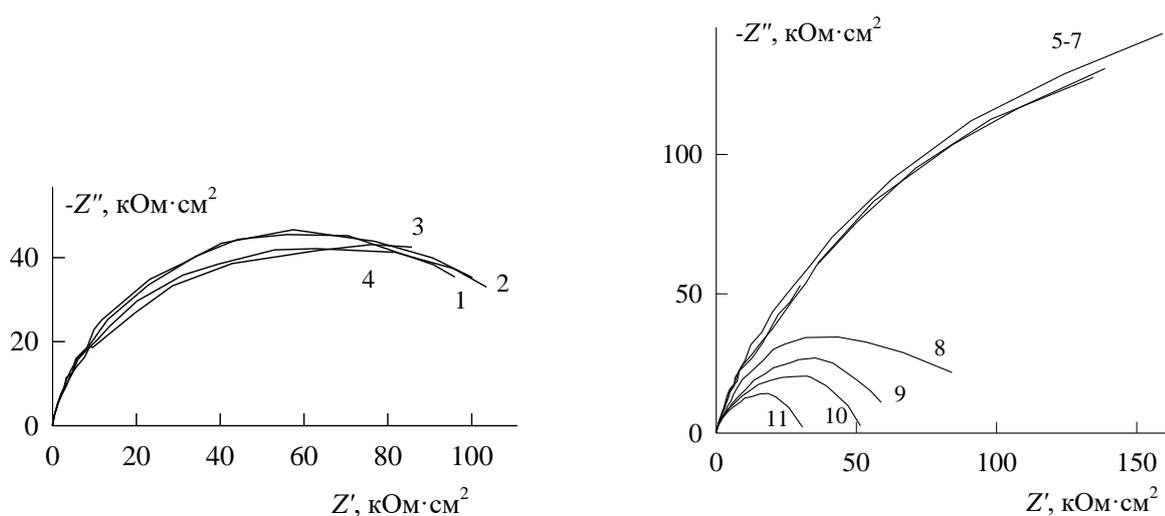


Рис. 7. Спектры импеданса CrSi₂-электрода в растворе 0,5 М HCl при E, В:
1 – -0,1; 2 – 0,1; 3 – 0,3; 4 – 0,5; 5 – 0,7; 6 – 0,9; 7 – 1,1; 8 – 1,3; 9 – 1,5; 10 – 1,7; 11 – 1,9

Заключение

Анодное поведение дисилицида хрома CrSi_2 в растворах 0,5 М H_2SO_4 , 0,5 М HClO_4 , 0,5 М HCl и 0,5 М HNO_3 в области потенциалов от E коррозии до E перепассивации включительно определяется поверхностной химически стойкой в кислых средах оксидной пленкой. Основу пленки составляет SiO_2 с небольшим содержанием оксидов хрома, стехиометрия которых зависит от величины электродной поляризации. Формирование оксидной пленки на CrSi_2 -электроде в области потенциалов от E коррозии до $E \approx 0,9$ В в исследованных растворах осуществляется по линейному закону: константы анодирования составляют 0,20–0,24 нм/В. Толщина оксидной пленки на силициде при этих значениях E варьирует в диапазоне 0,6–1,0 нм и увеличивается в ряду: 0,5 М $\text{HCl} < 0,5$ М $\text{HClO}_4 < 0,5$ М $\text{H}_2\text{SO}_4 < 0,5$ М HNO_3 . В этом же ряду возрастает анодная стойкость CrSi_2 .

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Список литературы

1. Гельд П.В., Сидоренко Ф.А. Силициды переходных металлов четвертого периода. М.: Металлургия, 1981. 632 с.
2. Ivanenko L., Lange H., Heinrich A. Semiconducting silicides. Berlin, 2000. Vol. 39. P. 243–297.
3. 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. Т. 27, № 4. С. 603–616.
4. Yuan L., Wang H.M. Corrosion behaviors of a γ -toughened $\text{Cr}_{13}\text{Ni}_5\text{Si}_2/\text{Cr}_3\text{Ni}_5\text{Si}_2$ multi-phase ternary metal silicide alloy in NaCl solution // Electrochimica Acta. 2008. Vol. 54. P. 421–429.
5. Xu J., Zhou C., Jiang S. Investigation on corrosion behavior of sputter-deposited nanocrystalline $(\text{MoxCr}(1-x))_5\text{Si}_3$ films by double cathode glow plasma // Intermetallics. 2010. Vol. 18, № 8. P. 1669–1675.
6. Xu J., Zhou C., Chen Z., Wang Y., Jiang S. Corrosion behaviors of $(\text{Cr,Fe})_3\text{Si}/\text{Cr}_{13}\text{Fe}_5\text{Si}_2$ composite coating under condition of synergistic effects of electrochemical corrosion and mechanical erosion // Journal of Alloys and Compounds. 2010. Vol. 496. P. 429–432.
7. Lytovchenko S.V. High-temperature silicides: properties and application // East European Journal of Physics. 2016. Vol. 3, № 3. P. 4–24.
8. Княжева В.М., Колотыркин Я.М. Анодная пассивация хрома в кислых растворах // ДАН СССР. 1957. Т. 114, № 6. С. 1265–1268.
9. Bjornkvist L., Olefjord I. The electrochemistry of chromium in acidic chloride solutions: anodic dissolution and passivation // Corrosion Science. 1991. Vol. 32, № 2. P. 231–242.
10. Справочник по электрохимии / под ред. А.М.Сухотина. Л.: Химия, 1981. 488 с.
11. Николайчук П.А. Термодинамическая оценка химической и электрохимической устойчивости системы Cr-Si // Ученые записи Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. 2019. Т. 1, № 4. С. 88–103.
12. 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.

13. Пантелеева В.В., Шеин А.Б., Кичигин В.И. Импеданс анодных процессов на силицидах металлов триады железа в кислых и щелочных средах // Коррозия: Материалы, защита. 2017. № 6. С. 1–10.

14. Zhang X.G. Electrochemistry of silicon and its oxide. New York: Kluwer Academic/Plenum Publ. 2001. 510 p.

15. Viswanath R.N., Chandra Bose A., Ramasamy S. Preparations and characterizations of nanostructured TiO_2 and $\text{TiO}_2\text{-Si(Ti)O}_2$ composite systems // Journal of Physics and Chemistry of Solids. 2001. Vol. 62, №. 11. P. 1991–1998.

16. Impedance Spectroscopy: Theory, Experiment, and Applications / Ed. by E. Barsoukov and J.R. Macdonald. John Wiley & Sons. 2005. 595 p.

References

1. Geld, P.V. and Sidorenko, F.A. (1981), *Silitsidy perekhodnykh metallov chetvertogo perioda* [Silicides of transition metals of the fourth period], Metallurgiya, Moscow. (In Russ.).

2. Borisenko, V.E. (2000), *Semiconducting silicides*, Springer-Verlag, Berlin, Germany.

3. Knyazheva, V.M., Babich, S.G., Kolotyркиn, V.I. and Kozhevnikov, V.B. (1991), “Metallics of the transitional metals - a new class of corrosion resistant materials and the protective coating”, *Zashhita metallov*, vol. 27, no. 4, pp. 603–616. (In Russ.).

4. Yuan, L. and Wang, H.M. (2008), “Corrosion behaviors of a γ -toughened $\text{Cr}_{13}\text{Ni}_5\text{Si}_2/\text{Cr}_3\text{Ni}_5\text{Si}_2$ multi-phase ternary metal silicide alloy in NaCl solution”, *Electrochimica Acta*, vol. 54, pp. 421–429.

5. Xu, J., Zhou, C. and Jiang, S. (2010), “Investigation on corrosion behavior of sputter-deposited nanocrystalline $(\text{Mo}_x\text{Cr}_{1-x})_5\text{Si}_3$ films by double cathode glow plasma”, *Intermetallics*, vol. 18, no. 8, pp. 1669–1675.

6. Xu, J., Zhou, C., Chen, Z., Wang, Y. and Jiang, S. (2010), “Corrosion behaviors of $(\text{Cr,Fe})_3\text{Si}/\text{Cr}_{13}\text{Fe}_5\text{Si}_2$ composite coating under condition of synergistic effects of electrochemical corrosion and mechanical erosion”, *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 496, pp. 429–432.

7. Lytovchenko, S.V. (2016), “High-temperature silicides: properties and application”, *East European Journal of Physics*, vol. 3, no. 3, pp. 4–24.

8. Knyazheva, V.M., Kolotyркиn, Ya.M. (1957), “Anodic passivation of chromium in acidic solutions”, *DAN SSSR*, vol. 114, no. 6, pp. 1265–1268. (In Russ.).

9. Bjornkvist, L., Olefjord, I. (1991), “The electrochemistry of chromium in acidic chloride solutions: anodic dissolution and passivation” *Corrosion Science*, vol. 32, no. 2, pp. 231–242.

10. Sukhotin, A. M. (ed.) (1981), *Spravochnik po elektrokhemii* [Electrochemistry Handbook], Khimiya, Leningrad. (In Russ.).

11. Nikolaychuk, P.A. (2019), “Thermodynamic evaluation of the chemical and electrochemical stability of the Cr-Si system”, *Uchenye zapisi Komsomol'skogo-na-Amure gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, vol. 1, no. 4, pp.88–103. (In Russ.).

12. Okuneva, T.G., Panteleeva, V.V., Shein, A.B. (2016), “Anodic processes on the Mn_5Si_3 electrode in acidic media”, *Kondensirovannye sredy i mezhfaznye granitsy*, vol. 18, no. 3, pp. 383–393. (In Russ.).

13. Panteleeva, V.V., Shein, A.B. and Kichigin, V.I. (2017), "Impedance of anode processes on metal silicides of the iron triad in acidic and alkaline solutions", *Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces*, vol.6, pp. 1–10. (In Russ.).
14. Zhang, X.G. (2001), *Electrochemistry of silicon and its oxide*, Kluwer Academic/Plenum Publ., New York, USA.
15. Viswanath, R.N., Chandra Bose A. and Ramasamy S. (2001), "Preparations and characterizations of nanostructured TiO₂ and TiO₂–Si(Ti)O₂ composite systems", *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, vol. 62, no. 11, pp. 1991–1998.
16. Impedance Spectroscopy: Theory, Experiment, and Applications / Ed. by E. Barsoukov and J.R. Macdonald. John Wiley & Sons, 2005.

Об авторах

Кирилл Владимирович Шадрин,
магистрант, кафедра физической химии
Пермский государственный национальный исследовательский университет
614990, Россия, г. Пермь, ул. Букирева, 15.
<https://orcid.org/0000-0002-5862-1139>
gusselmayer@mail.ru

Виктория Вячеславовна Пантелеева,
кандидат химических наук,
доцент кафедры физической химии
Пермский государственный национальный исследовательский университет
614990, Россия, г. Пермь, ул. Букирева, 15.
<https://orcid.org/0000-0002-1506-6665>
vikpant@mail.ru

Анатолий Борисович Шеин,
доктор химических наук, профессор,
заведующий кафедрой физической химии
Пермский государственный национальный исследовательский университет
614990, Россия, г. Пермь, ул. Букирева, 15.
<https://orcid.org/0000-0002-2102-0436>
ashein@psu.ru

About the authors

Kirill V. Shadrin,
Master student, Department of Physical Chemistry
Perm State University
15, Bukirev st., Perm, 614990, Russia.
<https://orcid.org/0000-0002-5862-1139>
gusselmayer@mail.ru

Viktoria V. Panteleeva,
Candidate of Chemical Sciences,
Associate Professor, Department of Physical Chemistry
Perm State University
15, Bukirev st., Perm, 614990, Russia.
<https://orcid.org/0000-0002-1506-6665>
vikpant@mail.ru

Anatoly B. Shein,
Doctor of Chemical Sciences, Professor,
Head of the Department of Physical Chemistry
Perm State University
15, Bukirev st., Perm, 614990, Russia.
<https://orcid.org/0000-0002-2102-0436>
ashein@psu.ru

Информация для цитирования:

Шадрин К.В., Пантелеева В.В., Шеин А.Б. Пассивация дисилицида хрома в кислых средах // Вестник Пермского университета. Серия «Химия». 2021. Т. 11, вып. 3. С. 202–211. DOI: 10.17072/2223-1838-2021-3-202-211.

Shadrin K.V., Panteleeva V.V., Shein A.B. *Passivatsiya disilitsida khroma v kislykh sredakh* [Passivation of chromium disilicide in acidic media], Bulletin of Perm University. Chemistry. 2021, vol. 11, no. 3, pp. 202–211. (In Russ.). DOI: 10.17072/2223-1838-2021-3-202-211.