ПРИКЛАДНАЯ ЭЛЕКТРОХИМИЯ И ЗАЩИТА МЕТАЛЛОВ ОТ КОРРОЗИИ

УДК 54.544.6

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОГО СИНТЕЗА ТОНКИХ ПЛЕНОК Sb_2S_3

© В. А. Меджидзаде[1], Г. С. Алиев[1,2], С. П. Джавадова[1], С. Ф. Джафарова[1], Н. И. Шыхалиев[3], Р. А. Исмаилова[3], А. Ш. Алиев[1], Д. Б. Тагиев[1]

[1] Институт катализа и неорганической химии им. акад. М. Нагиева Министерства науки и образования Азербайджана,
AZ 1143, Азербайджан, г. Баку, пр. Г. Джавида, д. 113
[2] Западно-Каспийский Университет,
AZ 1001, Азербайджан, г. Баку, ул. Истиглалият, д. 31
[3] Азербайджанский технический университет,
AZ 1073, Азербайджан, г. Баку, пр. Г. Джавида, д. 25
E-mail: vuska_80@mail.ru

Поступила в Редакцию 11 сентября 2023 г.
После доработки 5 июня 2024 г.
Принята к публикации 10 июля 2024 г.

Проведено математическое моделирование и оптимизация технологического процесса электрохимического осаждения тонких пленок Sb_2S_3 гальваностатическим методом в различных условиях на никелевых электродах. На основании изучения влияния различных факторов (концентрация исходных компонентов, температура, плотность тока и т. д.) выбраны оптимальный режим электролиза и состав электролита для процесса совместного осаждения. Проведен статистический анализ полученного уравнения регрессии, вычислена средняя ошибка аппроксимации, оценено среднеквадратичное отклонение. Для оценки построенного уравнения множественной регрессии вычислен критерий Фишера и оценены коэффициенты регрессии. Полученное уравнение регрессии определяет содержание электролита и условия электролиза, позволяющие осаждать сплав Sb–S, содержащий в составе необходимое количество Sb. Математические расчеты были выполнены в программном пакете с использованием специально разработанного для этого процесса программного обеспечения.

Ключевые слова: *математическое моделирование; средняя ошибка аппроксимации; критерий Фишера; тонкие пленки Sb_2S_3; уравнение регрессии*
DOI: 10.31857/S0044461824020075; EDN: VUYQWO

В последние годы халькогениды металлов привлекли большое внимание благодаря своим уникальным электрическим и оптическим свойствам [1–8]. Среди этих материалов сульфид сурьмы (Sb_2S_3) — важный полупроводниковый материал с хорошо известными квантовыми эффектами, фоточувствительностью, термоэлектрическими свойствами и т. д. [9–12].

Сульфид сурьмы (Sb_2S_3) имеет уникальную параллельную цепочечную структуру, в которой один атом Sb координирован в плоскости сильными ковалентными связями с тремя атомами S, а другой атом

Sb координирован с пятью атомами S, из которых три атома связаны прочными ковалентными связями внутри одной цепи, а два других атома S связаны слабой ван-дер-ваальсовой связью с соседней параллельной цепью [13]. Из-за такой структуры Sb_2S_3 отличается сильным поглощением фотонов и электропроводностью, необходимыми для фотоанодов [14, 15].

Цель исследования — разработка уравнения регрессии процесса электроосаждения Sb_2S_3. Тонкие пленки Sb_2S_3 синтезированы электрохимическим методом [16, 17]. При электроосаждении происходит так называемая самосборка частиц, т. е. предварительно сформированные дисперсные частицы из источников катионов и анионов, смешанных с электролитом, послойно прикрепляются к растущей поверхности. В этом случае качество пленки зависит от свойств используемых наночастиц, а также от условий эксперимента, включая контроль величин тока или потенциала. При этом для получения тонких пленок определение оптимального режима синтеза требует проведения многочисленных экспериментов, отнимающих много времени. Во избежание этого на основе полученных результатов составляется математическая модель процесса электроосаждения, что сокращает число проводимых экспериментов и время, затраченное на исследования [18–21].

Математическое моделирование — мощный инструмент для вычисления максимальной рентабельности и решения различных проблем, возникающих при синтезе тонких пленок. Построение математической модели электрохимического процесса и выбор основных параметров, выраженных в виде математических функций, позволяет увеличить выход вещества и снизить его себестоимость [22]. При этом математическая модель должна не только точно описывать фактический процесс, но и обеспечивать точность расчетов, будучи достаточно простой. Используя методы математической статистики результатов процесса, можно легко определить влияние важных параметров (концентрация исходных компонентов, температура, плотность тока) на процесс и его протекание. На основе полученных экспериментальных результатов электроосаждения и для их подтверждения было составлено уравнение регрессии, вычислен критерий значимости и адекватности [23–27].

Экспериментальная часть

Исследование фазового состава, морфологии, рельефа и определение элементного состава (энергодисперсионная спектроскопия, ЭДС) электроосажденных образцов Sb_2S_3 проводили с помощью рентгенофазового (РФА) анализатора D2 Phaser (Bruker; фильтр Cu_{K_α}, Ni-электрод) и сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) марки Carel Zeiss Sigma, а также фотокалориметрическим методом.

Для приготовления электролитов химические чистые исходные вещества SbOCl (2A Pharmachem) и Na_2SO_3 (ООО «АО Реахим») по отдельности растворяли в бидистиллированной воде, содержащей 0.007 М винной кислоты (х.ч.) (IndiaMART).

Вычислительный эксперимент. Для подтверждения экспериментальных данных исследуемого процесса на их основе было составлено регрессионное уравнение

$$Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_3, \qquad (1)$$

где b_i — эмпирические коэффициенты, X_i — факторы процесса, Y — количество Sb в пленке Sb_2S_3, а также рассчитаны критерии значимости и адекватности [23–27].

Вычисления выполнены с помощью специально разработанного для этого процесса программного обеспечения. При планировании полного факторного эксперимента (ПФЭ) данного процесса реализуются все возможные комбинации факторов на всех выбранных для исследования уровнях (табл. 1).

Уравнение регрессии для данного процесса составлено и оценено методом множественной регрессии. В частности, полученный вектор оценок коэффициентов регрессии имеет вид

$$Y(X) = \begin{array}{|c|c|c|c|}\hline 1.154 & -0.0556 & -9.299 & -10.641 \\ \hline — & 0.0112 & 0.0359 & 0.132 \\ \hline -9.299 & 0.0359 & 374.08 & -168.714 \\ \hline -10.641 & 0.132 & -168.714 & 410.012 \\ \hline \end{array} \times$$

$$\times \begin{array}{|c|}\hline 946.6 \\ \hline 3664.15 \\ \hline 43.868 \\ \hline 41.158 \\ \hline \end{array} = \begin{array}{|c|}\hline 43.04 \\ \hline -4.679 \\ \hline 794.987 \\ \hline -113.973 \\ \hline \end{array}.$$

Отсюда следует, что уравнение регрессии (оценка уравнения регрессии) имеет следующий вид:

$$Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_3 =$$

$$43.0397 - 4.6794X_1 + 794.9869X_2 - 113.9731X_3, \qquad (2)$$

где X_1 — плотность тока (мА·см$^{-2}$), X_2 и X_3 — исходные концентрации SbOCl и Na_2SO_3 соответственно, Y — конечное количество Sb_2S_3 (%).

Таблица 1

Результаты проведенных экспериментов процесса электроосаждения Sb_2S_3

N	Плотность тока, мА·см$^{-2}$	Концентрация SbOCl, М	Концентрация Na_2SO_3, М	Количество Sb в пленке Sb_2S_3, %		Относительная погрешность $[Y_э - Y_р]/Y_э$
				$Y_э$ эксперимент	$Y_р$ расчет	
1	1.5	0.025	0.025	42.3	53.04595	0.202578
2	2.5	0.025	0.025	45.0	48.36655	0.069605
3	5.0	0.025	0.025	47.8	36.66805	0.303587
4	6.0	0.025	0.025	42.5	31.98865	0.328596
5	8.0	0.025	0.025	15.1	22.62985	0.33274
6	1.5	0.05	0.05	69.8	70.07129	0.003872
7	2.5	0.05	0.05	67.7	65.39189	0.035297
8	5.0	0.05	0.05	62.5	53.69339	0.164017
9	7.0	0.05	0.05	37.6	44.33459	0.151904
10	1.5	0.06	0.04	74.2	79.16089	0.062668
11	2.5	0.06	0.04	72.5	74.48149	0.026604
12	5.0	0.06	0.04	69.8	64.78299	0.07187
13	6.0	0.06	0.04	61.9	58.10359	0.065339
14	7.0	0.06	0.04	47.5	53.42419	0.11089
15	1.5	0.04	0.06	62.1	60.98169	0.018338
16	2.5	0.04	0.06	60.1	56.30229	0.067452
17	6.0	0.04	0.06	42.5	39.92439	0.064512
18	7.0	0.04	0.06	25.7	35.24499	0.270818

Таблица 2

Результаты вычислений несмещенной дисперсии

Y	$Y(x)$	$\varepsilon = Y - Y(x)$	ε^2	$(Y - Y_{ср})^2$	$\lvert\varepsilon{:}Y\rvert$
42.3	53.046	–10.746	115.477	105.861	0.154
45	48.367	–3.367	11.334	57.591	0.0748
47.8	36.668	11.132	123.916	22.933	0.233
42.5	31.989	10.511	110.483	101.786	0.247
15.1	22.63	–7.53	56.703	1405.417	0.329
69.8	70.071	–0.271	0.0736	296.222	0.00389
67.7	65.392	2.308	5.327	228.346	0.0341
62.5	53.694	8.806	77.553	98.23	0.141
37.6	44.335	–6.735	45.359	224.667	0.119
74.2	79.161	–4.961	24.611	467.04	0.0669
72.5	74.482	–1.982	3.927	396.452	0.0273
69.8	62.783	7.017	49.236	296.222	0.101
61.9	58.104	3.796	14.411	86.697	0.0613
47.5	53.424	–5.924	35.099	25.897	0.125
62.1	60.982	1.118	1.25	90.461	0.018
60.1	56.302	3.798	14.422	56.417	0.0632
42.5	39.925	2.575	6.633	101.786	0.0606
25.7	35.245	–9.545	91.112	723.012	0.371
—	—	—	786.926	4785.038	1.56

Также проведен статистический анализ полученного уравнения регрессии: проверка значимости уравнения и его коэффициентов, исследование абсолютных и относительных ошибок аппроксимации. Для нахождения несмещенной оценки дисперсии были осуществлены следующие вычисления (табл. 2).

Средняя ошибка аппроксимации была рассчитана по формуле

$$A = \frac{\Sigma|\varepsilon:Y|}{n}\cdot 100\% = \frac{1.56}{18}\cdot 100\% = 8.67\% \qquad (3)$$

и оценено среднеквадратичное отклонение:

$$S = \sqrt{S^2} = \sqrt{34.24} = 5.85. \qquad (4)$$

Обсуждение результатов

В выражении (2) коэффициент b_1 показывает, что с увеличением плотности тока на 1 мА·см$^{-2}$ количество Sb_2S_3 уменьшается на 0.046%; коэффициенты b_2 и b_3 свидетельствуют о том, что с увеличением концентраций SbOCl и Na_2SO_3 на 0.1 моль·л$^{-1}$ количество осажденного Sb_2S_3 увеличивается на 7.94 и 1.14% соответственно. Это показывает, что самым чувствительным параметром, влияющим на выход Sb_2S_3, является исходная концентрация SbOCl. Из рис. 1 видно, что максимальному выходу Sb соответствует плотность тока 4.5 мА·см$^{-2}$.

На рис. 2 показана зависимость выхода Sb от концентрации SbOCl; видно, что с увеличением концентрации SbOCl выход Sb в пленке Sb_2S_3 тоже повышается.

Рис. 3 показывает, что максимальному выходу Sb в пленке соответствует исходная концентрация Na_2SO_3 0.042 моль·л$^{-1}$.

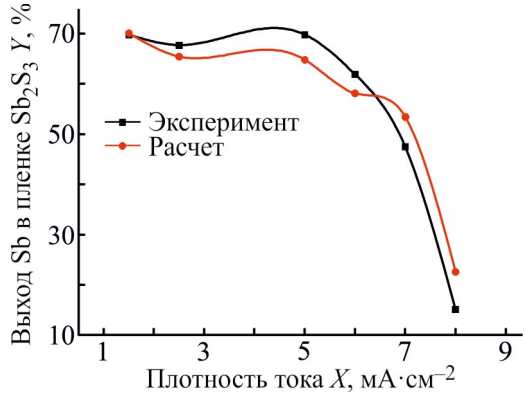

Рис. 1. Зависимость выхода Sb от плотности тока в пленке Sb_2S_3.

Если факторные признаки различны по своей сущности и имеют различные единицы измерения, то коэффициенты регрессии b_i при разных факторах являются несопоставимыми. Поэтому уравнение регрессии дополняют соизмеримыми показателями тесноты связи фактора с результатом, позволяющими ранжировать факторы по силе влияния на результат.

Далее была проведена проверка значимости параметров множественного уравнения регрессии (2).

Число степеней свободы системы равно $v = n - m - 1$, где n — количество экспериментов, m — число оцениваемых параметров.

Считается, что при оценке множественной линейной регрессии для обеспечения статистической надежности необходимо, чтобы число наблюдений по крайней мере в 3 раза превосходило число оцениваемых параметров. Проверка общего качества уравнения множественной регрессии проведена с помощью критерия Фишера [26].

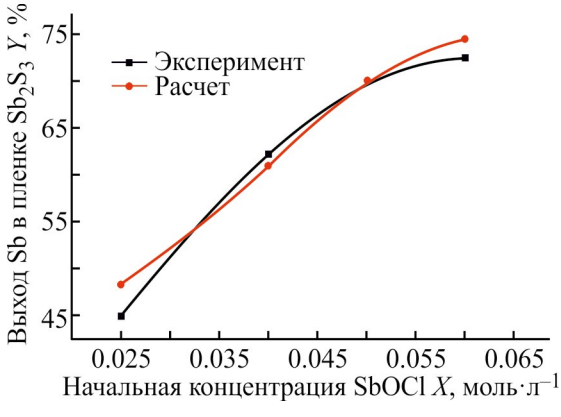

Рис. 2. Зависимость выхода Sb от концентрации SbOCl в пленке Sb_2S_3.

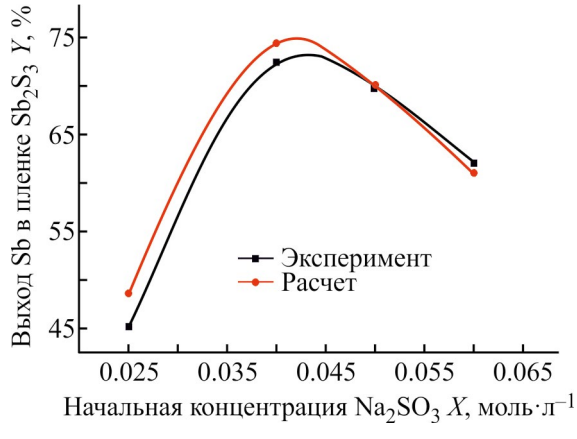

Рис. 3. Зависимость выхода Sb от исходной концентрации Na_2SO_3 в пленке Sb_2S_3.

$$R^2 = 1 - \frac{s^2}{\Sigma(y_i - \bar{y})^2} = 1 - \frac{786.926}{4785.04} = 0.8355, \quad (5)$$

$$F = \frac{R^2}{1 - R^2} \cdot \frac{n - m - 1}{m} = \\ = \frac{0.8355}{1 - 0.8355} \cdot \frac{18 - 3 - 1}{3} = 23.71, \quad (6)$$

где F — критерий Фишера, R — множественный коэффициент корреляции.

При степенях свободы $k_1 = 3$ и $k_2 = n - m - 1 = 18 - 3 - 1 = 14$ табличное значение критерия Фишера $F_{kp}(k_1; k_2) = F_{kp}(3; 14) = 5.56$ [26].

Поскольку фактическое значение $F > F_{kp}$, коэффициент детерминации статистически значим и уравнение регрессии статистически надежно.

Выводы

В результате расчетов получено уравнение множественной регрессии: $Y = 43.0397 - 4.6794X_1 + 794.9869X_2 - 113.9731X_3$. Анализ данного уравнения показывает, что с увеличением плотности тока на 1 мА·см$^{-2}$ количество Sb_2S_3 уменьшается на 0.046%, с увеличением начальной концентрации SbOCl на 0.1 моль·л$^{-1}$ количество Sb_2S_3 увеличивается на 7.94%, а с увеличением начальной концентрации Na_2SO_3 на 0.1 моль·л$^{-1}$ количество Sb_2S_3 увеличивается на 1.14%. Это означает, что самым чувствительным параметром, влияющим на выход Sb_2S_3, является начальная концентрация SbOCl. Статистическая значимость уравнения проверена с помощью коэффициента детерминации и критерия Фишера. Установлено, что в исследуемой ситуации 83.55% общей вариабельности выходного количества Sb–S объясняется изменением плотности тока и начальных концентраций SbOCl и Na_2SO_3.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

Информация о вкладе авторов

В. А. Меджидзаде написала и оформила статью; Г. С. Алиев построил графики и интерпретировал их; С. П. Джавадова проводила электрохимическое осаждение тонких пленок; С. Ф. Джафарова проводила термический отжиг осажденных тонких пленок; Н. И. Шыхалиев и Р. А. Исмаилова изучили математическое моделирование и оптимизацию технологического процесса полученных тонких пленок; А. Ш. Алиев предложил метод электрохимического получения тонких пленок и помог в обсуждении полученных результатов; Д. Б. Тагиев интерпретировал полученные результаты анализов.

Информация об авторах

Меджидзаде Вюсала Асим кызы, к.х.н., доцент
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5639-3104
SCOPUS: Author ID: 57193275482
https://scholar.google.com/citations?hl=ru&user=owWOjdIAAAAJ
Web of Science ResearcherID P-9196-2019

Алиев Гошгар Сейфулла оглы, к.х.н., доцент
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2237-3444
SCOPUS: Author ID: 55646110800
https://scholar.google.com/citations?user=6i6cuMwAAAAJ&hl=ru
Web of Science ResearcherID AAA-1293-2019

Джавадова Севиндж Пири кызы
ORCID: https://sandbox.orcid.org/0000-0001-7974-6072
https://scholar.google.com/citations?hl=en&user=Wcp1x1oAAAAJ
SCOPUS: Author ID: 57221292178
Web of Science ResearcherID CXU-8057-2022

Джафарова Самира Фикрет кызы, к.х.н.
ORCID: https://orcid.org/0009-0001-3928-2960
Web of Science ResearcherID CWN-4046-2022
https://scholar.google.com/citations?user=DBy_VG4AAAAJ&hl=en

Шыхалиев Низами Исмаил оглы, к.ф-м.н., доцент
ORCID: https://orcid.org/0009-0003-4474-1855

Исмаилова Рена Ашраф кызы, к.м.н.
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5841-3420

Алиев Акиф Шихан оглы, д.х.н., проф.
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0560-5263
SCOPUS: Author ID: 56385376400
https://scholar.google.com/citations?user=22Sn7vcAAAAJ&hl=ru&authuser=2
Web of Science ResearcherID W-7967-2019

Тагиев Дильгам Бабир оглы, акад.
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8312-2980
SCOPUS: Author ID: 6508009961
https://scholar.google.com/citations?hl=ru&authuser=1&user=UlbDnIwAAAAJ
Web of Science ResearcherID HTP-0119-2023

Список литературы

[1] *Chen J.-H., Chiu S.-K., Luo J.-D., Huang S.-Y., Ting H.-A., Hofmann M., Hsieh Y.-P., Ting C.-C.* Robust

formation of amorphous Sb_2S_3 on functionalized graphene for high-performance optoelectronic devices in the cyan-gap // Sci. Reports. 2020. V. 10. Article number: 14873. https://doi.org/10.1038/s41598-020-70879-1

[2] *Lee J., Kim D., Park J., Oh J.-W., Kang Y.-C.* Tailoring the surface characteristics of CuSe thin films by adjusting the compositional ratio // Phys. Status Solidi A. 2021. 218. 2100148. https://doi.org/10.1002/pssa.202100148

[3] *Park J., Seo J., Lim J.-H., Yoo B.* Synthesis of copper telluride thin films by electrodeposition and their electrical and thermoelectric properties // Front Chem. 2022. V. 10. 799305. https://doi.org/10.3389/fchem.2022.799305

[4] *Hossain M. I., Siddiquee K. A. M. H., Islam O., Gafur M. A., Qadir M. R., Ahmed N. A.* Characterization of electrodeposited ZnTe thin films // J. Opt. 2019. V. 48. P. 295–301. https://doi.org/10.1007/s12596-019-00550-0

[5] *Bala M., Bhogra A., Khan S. A., Tripathi T. S., Tripathi S. K., Avasthi D. K., Asokan K.* Enhancement of thermoelectric power of PbTe thin films by Ag-ion implantation // J. Appl. Phys. 2017. V. 121. 215301. https://doi.org/10.1063/1.4984050

[6] *Khadir A.* Performance investigation of Sb_2S_3 and Sb_2Se_3 earth abundant based thin film solar cells // Opt. Mater. 2022. V. 127. 112281. https://doi.org/10.1016/j.optmat.2022.112281

[7] *Jing Y., Jie W. H., Jia S. W., Liang X. X.* Superamphiphobic, light-trapping $FeSe_2$ particles with a micro-nano hierarchical structure obtained by an improved solvothermal method // Chin. Phys. B. 2014. V. 23. 016803. https://doi.org/10.1088/1674-1056/23/1/016803

[8] *Zeynalova A. O., Javadova S. P., Majidzade V. A., Aliyev A. Sh.* Electrochemical synthesis of iron monoselenide thin films // Chem. Problems. 2021. V. 19. N 4. P. 262–271. https://doi.org/10.32737/2221-8688-2021-4-262-271

[9] *Wallace A. G., King R. P., Zhelev N., Jaafar A. H., Levason W., Huang R., Reid G., Bartlett P. N.* Anodic Sb_2S_3 electrodeposition from a single source precursor for resistive random-access memory devices // Electrochim. Acta. 2022. V. 432. 141162. https://doi.org/10.1016/j.electacta.2022.141162

[10] *de Araújo Moisés A., Lucas Francisco W. S., Mascaro Lucia H.* Effect of the electrodeposition potential on the photoelectroactivity of the SnS/Sb_2S_3 thin films // J. Solid State Electrochem. 2020. V. 24. P. 389–399. https://doi.org/10.1007/s10008-020-04508-2

[11] *Avilez Garcia R. G., Meza Avendaño C. A., Pal Mou, Paraguay Delgado F., Mathews N. R.* Antimony sulfide (Sb_2S_3) thin films by pulse electrodeposition: Effect of thermal treatment on structural, optical and electrical properties // Mater. Sci. Semicond. Process. 2016. V. 44. P. 91–100. https://doi.org/10.1016/j.mssp.2015.12.018

[12] *Zhou B., Hayashi T., Hachiya K., Sagawa T.* Preparation of Sb_2S_3 nanorod arrays by hydrothermal method as light absorbing layer for Sb_2S_3-based solar cells // Thin Solid Films. 2022. V. 757. 139389. https://doi.org/10.1016/j.tsf.2022.139389

[13] *Sharma V., Das T. K., Ilaiyaraja P., Dakshinamurthy A. C., Sudakar C.* Growth of Sb_2S_3 semiconductor thin film on different morphologies of TiO_2 nanostructures // Mater. Res. Bull. 2020. V. 131. ID 110980. https://doi.org/10.1016/j.materresbull.2020.110980

[14] *Zakaznova-Herzog V. P., Harmer S. L., Nesbitt H. W., Bancroft G. M., Flemming R., Pratt A. R.* High resolution XPS study of the large-band-gap semiconductor stibnite (Sb_2S_3): Structural contributions and surface reconstruction // Surf. Sci. 2006. V. 600. N 2. P. 348–356. https://doi.org/10.1016/j.susc.2005.10.034

[15] *Park Y. S., Jin X., Tan J., Lee H., Yun J., Ma S., Jang G., Kim T., Shim S. G., Kim K., Lee J., Lee Ch. U., Hwang S.-J., Moon J.* High-performance Sb_2S_3 photoanode enabling iodide oxidation reaction for unbiased photoelectrochemical solar fuel production // Energy Environ. Sci. 2022. N 15. P. 4725–4737. https://doi.org/10.1039/d1ee02940a

[16] *Меджидзаде В. А., Джавадова С. П., Джафарова С. Ф., Алиев А. Ш., Тагиев Д. Б.* Электрохимическое осаждение тонких пленок Sb_2S_3 // ЖПХ. 2022. Т. 95. № 10. С. 1329–1336. https://doi.org/10.31857/S0044461822100127 [*Majidzade V. A., Javadova S. P., Jafarova S. F., Aliyev A. Sh., Tagiyev D. B.* Electrochemical deposition of Sb_2S_3 thin films // Russ. J. Appl. Chem. 2022. V. 95. N 10. P. 1627–1633. https://doi.org/10.1134/S1070427222100147].

[17] *Majidzade V. A., Jafarova S. F., Javadova S. P., Aliyev A. Sh., Tagiyev D. B.* The latest progress on synthesis and investigation of Sb_2S_3-based thin films // Chem. Problems. 2023. V. 21. N 2. P. 99–122. https://doi.org/10.32737/2221-8688-2023-2-99-122

[18] *Javadova S. P., Majidzade V. A., Aliyev Q. S., Aliyev A. Sh., Tagiyev D. B.* Mathematical modeling of the electrodeposition process of bismuth-selenium system // Chem. Problems. 2021. V. 19. N 1. P. 47–55. https://doi.org/10.32737/2221-8688-2021-1-47-55

[19] *Majidzade V. A., Aliyev G. S., Aliyev A. Sh., Huseynova R. H., Mammadova Z. M.* Mathematical modeling and optimization of the electrodeposition process of antimony-selenium system // Azerb. Chem. J. 2021. N 1. P. 30–36. https://doi.org/10.32737/0005-2531-2021-1-30-36

[20] *Jafarova S. F*. Mathematical modeling for the electrochemical deposition process of molybdenum-sulfur system // Processes of Petrochem. and Oil Refining. 2019. V. 20. N 2. P. 138–144.
[21] *Majidzade V. A., Javadova S. P., Aliyev G. S., Aliyev A. Sh., Tagiyev D. B*. Electrodeposition of Sb–Se thin films from organic electrolyte // Chem. Africa. 2022. V. 5. P. 2085–2094. https://doi.org/10.1007/s42250-022-00480-8
[22] *Меджидзаде В. А., Алиев Г. С., Джавадова С. П., Алиев А. Ш., Дадашова С. Д., Тагиев Д. Б.* Математическое моделирование и оптимизация процесса формирования функциональных тонких пленок // Математическое моделирование. 2022. Т. 34. № 6. С. 111–119. https://doi.org/10.20948/mm-2022-06-07
[*Majidzade V. A., Aliyev G. S., Javadova S. P., Aliyev A. Sh., Dadashova S. D., Tagiyev D. B.* Mathematical modeling and optimization of the process of formation of functional thin $MoSe_2$ films // Math. Models. Comput. Simul. 2023. V. 15. P. 73–78. https://doi.org/10.1134/S2070048223010118
[23] *Самарский А. А*. Введение в численные методы. М.: Лань, 2005. 288 с.
[24] *Самарский А. А., Михайлов А. П*. Математическое моделирование. Идеи. Методы. Примеры. М.: Физматгиз, 1997. 320 с.
[25] *Быков В. И., Журавлев В. М*. Моделирование и оптимизация химико-технологических процессов. Красноярск: ИПЦ КГТУ, 2002. 298 с.
[26] *Ахназарова С. Л., Кафаров В. В*. Методы оптимизации эксперимента в химической технологии. М.: Высш. шк., 1985 327 с.
[27] *Кафаров В. В*. Методы кибернетики в химии и химической технологии. Л.: Химия, 1971. 190 с.

Научное редактирование проведено научным редактором журнала «Нефтехимия» к.х.н. Н. В. Шелеминой.