

Научная статья

УДК 661.1

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.27408>

П.С. Вишняков¹ ✉, Ш. Пэн², М.Ю. Максимов¹

¹ Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Россия;

² Нанкинский университет авиации и космонавтики,
Нанкин, Китай

✉ vishnyakovpaul@gmail.com

СИНТЕЗ И ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НАНОПОКРЫТИЙ ТВЕРДОГО ЭЛЕКТРОЛИТА ЛИТИРОВАННОГО ОКСИДА ТАНТАЛА

Аннотация. Нанесение нанопокровтий между электродами и электролитом является одной из самых многообещающих технологий увеличения безопасности и долговечности твердотельных аккумуляторов (ТЛИА). В статье представлены результаты детального микроскопического и электрохимического анализа многослойных тонких пленок. Исследованные структуры состоят из аморфного слоя Li-O и слоя Ta-O, полученного методом атомно-слоевого осаждения на кремневую и стальную подложки. Было показано, что скорость роста пленок составляет 0,21 нм/суперцикл и соответствует теоретическому при заданных условиях синтеза. По рентгенограмме можно судить, что слои Li-O и Ta-O по структуре рентгеноаморфны с небольшим содержанием нанокристаллитов Ta₂O₅. соотношение компонентов Ta:O в полученных пленках было 1:4, что близко к теоретическому LiTaO₃. Однако смешанных оксидов системы Li-Ta-O и органических остатков прекурсора Ta(OEt)₅ не обнаружено, что говорит о многослойности пленки. Анализ циклических вольтамперограмм показал отсутствие взаимодействия с жидким электролитом в диапазоне потенциалов катода (4,3–3,0 В). Кроме того, покрытия не вносят значительный вклад в электрохимическую емкость, таким образом они могут использоваться в качестве функционального слоя между твердым электролитом и электродами в ТЛИА.

Ключевые слова: атомно-слоевое осаждение, многослойная структура, твердый электролит, функциональный слой, твердотельные аккумуляторы.

Для цитирования:

Вишняков П.С., Пэн Ш., Максимов М.Ю. Синтез и электрохимические характеристики нанопокровтий твердого электролита литированного оксида тантала // *Материаловедение. Энергетика.* 2021. Т. 27, № 4. С. 106–116. DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.27408>

Эта статья открытого доступа, распространяемая по лицензии CC BY-NC 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

Scientific article

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.27408>*P.S. Vishniakov*¹ ✉, *S. Peng*², *M.Yu. Maximov*¹¹ Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,
St. Petersburg, Russia;² Nanjing University of Aeronautics and Astronautics,
Nanjing, China✉ vishnyakovpaul@gmail.com

SYNTHESIS AND ELECTROCHEMICAL CHARACTERISTICS OF NANOCOATINGS OF LITHIATED TANTALUM OXIDE SOLID ELECTROLYTE

Abstract. One of the most promising technologies for increasing the safety and durability of solid-state batteries (SSB) is nano-coating between electrodes and electrolytes. The paper presents the results of a detailed microscopic and electrochemical analysis of multilayer thin films. The investigated multilayer structures consist of a two-layer system of an amorphous Li-O layer and a Ta-O layer obtained by atomic-layer deposition on Si and steel substrate. The results show that the growth rate of the films is 0.21 nm/supercycle, which corresponds to the theoretical one under the given synthesis conditions. The X-ray diffraction pattern shows that the Li-O and Ta-O layers are X-ray amorphous with a small content of Ta₂O₅ nanocrystallites. The ratio of the Ta:O components in the films obtained was 1:4, which is close to the theoretical LiTaO₃. However, no mixed oxides of the Li-Ta-O system were found, which indicates that the film is multilayered. Analysis of cyclic voltammograms showed no interaction with liquid electrolyte in the range of cathode potentials (4.3–3.0 V). In addition, the coatings do not significantly contribute to the electrochemical capacity so that they can be used as a functional layer between solid electrolytes and electrodes in SSB.

Keywords: atomic layer deposition, multilayered structure, solid electrolyte, functional layer, solid-state batteries.

Citation:

P.S. Vishniakov, S. Peng, M.Yu. Maximov, Synthesis and electrochemical characteristics of nanocoatings of lithiated tantalum oxide solid electrolyte, *Materials Science. Power Engineering*, 27 (04) (2021) 106–116, DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.27408>

This is an open access article under the CC BY-NC 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

Введение. Развитие электрооборудования привело к появлению целой сети подключенных малогабаритных устройств и объектов, требующих надежных, безопасных и энергоемких источников питания. Твердотельные литий-ионные аккумуляторы (ТЛИА) соответствуют этим требованиям, что объясняется их значительным циклическим ресурсом [1], низким саморазрядом [2], безопасностью использования [3], в отличие от ЛИА с жидкими электролитами. Однако к ТЛИА предъявляется ряд требований. Электролиты в ТЛИА должны быть механически и электрохимически стабильными, иметь минимальное сопротивление интерфейса и обеспечивать идеальный контакт между отдельными слоями аккумулятора [4]. На практике из-за несовершенных систем возникает несколько проблем, таких как проблемы с контактом [5], рост дендритных структур лития на границе с анодом [6], несоответствие кристаллических решеток аккумуляторных ячеек [7], образование взаимной диффузии [8], формирование слоя пространственного заряда [9], иммобилизация Li [10], проблемы тепловыделения [11].

Существуют различные методы улучшения физических контактов в ТЛИА, такие как использование гибридных электролитов и композитных электродов. Реализация таких структур возможна благодаря применению метода молекулярного наслаивания (атомно-слоистого осаждения, АСО) [12]. За счет циклического повторения самоограничивающихся контролируемых реакций газофазного реагента с поверхностью подложки можно обеспечить постоянную скорость роста пленок [13]. Таким образом, пленки, полученные методом АСО, имеют однородный химический состав и необходимую толщину по всей поверхности. Промежуточный слой, сформированный АСО, может увеличить окно электрохимической стабильности электролита без увеличения межфазного сопротивления. Кроме того, структуры покрытий с функцией электролита должны обладать химической стабильностью в отношении металлического лития и поверхности электролита, высокой ионной проводимостью и высоким модулем сдвига [14]. Оксиды металлов (Al_2O_3 , LiTaO_3 , LiNbO_3) являются основными кандидатами из-за хорошего межслойного смачивания, предотвращения образования дендритов лития [15], снижения межфазного сопротивления [16] и подавления образования слоя пространственного заряда [17]. ТЛИА на основе оксидов демонстрирует высочайший уровень безопасности и лучшую термическую стабильность [3].

В качестве реагента для получения оксидов тантала может быть использован этоксид тантала (V) ($\text{Ta}(\text{OEt})_5$), который стандартных условиях представляет собой жидкость с давлением насыщенного пара достаточным для процессов АСО (6 мм рт. Ст. При 190°C) [18]. Кроме того, реагент относительно стабилен при хранении, не разлагается в температурном диапазоне синтеза [19].

Таким образом данной работой посвящена получению и исследованию химического состава, структуры (фазовый состав, плотность тонких пленок, шероховатость), морфологии пленок Li-Ta-O и его электрохимических характеристик.

Методы и материалы

Синтез пленок литированного оксида тантала по методу атомно-слоевого осаждения проводили на установке Picosun R-150 при температуре реактора 300°C . Этоксид тантала (V) ($\text{Ta}(\text{OEt})_5$) и трет-Бутилат лития (LiOtBu) выступали в качестве реагентов для получения монооксидов металлов Ta-O и Li-O, соответственно. Удаленная кислородная плазма использовалась в качестве сореагента (окислителя). Мощность плазмы 3000 Вт, частота 1,9–3,2 МГц, общая длительность импульса плазмы 19,5 с. Для получения пленок твердого электролита были проведены серии экспериментов с соотношениями количества напусков $\text{LiOtBu}/\text{Ta}(\text{OEt})_5$ в суперцикле: 1:2 с параметрами синтеза представлены в табл. 1. Соотношения были выбраны, опираясь на данные работы [18], в которой показано что с увеличением содержания лития в Li_xTaO_y от $x = 0,32$ до 0,98 происходит улучшение литий-ионной проводимости на два порядка, но более высокая концентрация лития ($x = 1,73$) приводит к снижению проводимости.

В качестве подложек для синтеза использовались подложки из монокристаллического кремния (ориентация поверхности (100), 40×40 мм, ООО «Теле-комСТВ», Зеленоград, Россия) и из нержавеющей стали (316SS, диаметр 16 мм, Tob New Energy Technology Co., Ltd., Сямэнь, Китай). Перед синтезом подложки из нержавеющей стали проходили отчистку в ультразвуковой ванне, заполненной ацетоном, а затем промывались дистиллированной водой.

Микрофотографии поверхности и поперечных сечений были получены на сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) Supra 55 VP (SEM, Zeiss, Оберкохен, Германия) с использованием детекторы вторичных электронов Эверхарта-Торнли и InLens. Пространственное разрешение составляло около 1,3 нм при ускоряющем напряжении 3 кВ. Проводилось исследование трех произвольно выбранных позиции на поверхности образца.

Толщины полученных пленок и расчета роста за цикл (GPC) определялись методом спектроскопическая эллипсометрия. измерения проводились на эллипсометре Ellips-1891 SAG (CNT, Новосибирск, Россия) в диапазоне длин волн $\lambda = 250\text{--}900$ нм (энергия фотонов $E = 1,4\text{--}5,0$ эВ)

и угле падения $\varphi = 70^\circ$. Диаметр пятна зонда составлял 3 мм. Погрешность измерения толщины составляла ± 1 нм.

Таблица 1

Параметры синтеза системы Li-Ta-O

Table 1

Parameters of Li-Ta-O system synthesis

Реагент	Температура испарителя, °С	Время пульса/продувки, с	Температура реактора, °С	Предполагаемая скорость роста, нм
Ta(OEt) ₅	190	1.5/10	300	0,05
LiOtBu	220	3/10	300	0,11

Элементный состав пленок определялся методом энергодисперсионной спектроскопии (ЭДС) с использованием системы INCA X-Max (Oxford Instruments, High Wycombe, UK) на микроскопе Supra 55 VP.

Фазовый состав пленок определялся методом дифракции рентгеновских лучей (РФА) на дифрактометре Bruker D8 DISCOVER (Cu-K α = 1,5406 Å) с использованием диапазона углов 2θ от 20 до 65° с шагом 0,1° и экспозиции 1 с на каждом шаге. Угол падения первичного рентгеновского пучка составлял 0,7°. Результаты обрабатывались с использованием программного пакета TOPAS (версия 5, Bruker, Billerica, MA, USA)

Для изучения фазового и химического состава по толщине пленки был использован метод рентгеновский фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС) на спектрометре Escalab 250Xi (Thermo Fisher Scientific, Waltham, США) с Al-K α (1486,7 эВ) излучением при давлении 10^{-8} Па. Для получения информации о внутренних слоях осаждаемой пленки проводилось травление Ag⁺ (500 эВ, 90 с).

Для электрохимических исследований использовали пленки, синтезированные на пластине из нержавеющей стали (SS). Литиевая фольга, полиолефиновая пористая пленка 2325 (Celgard, Шарлотта, Северная Каролина, США) и TC-E918 (Tinci, Гуанчжоу, Китай) использовались в качестве противоэлектрода, сепаратора и электролита соответственно. Состав TC-E918 представлял собой 1M раствор LiPF₆ в смеси органических карбонатов. Циклирование проводили в макетах типа CR2032, которые собирали в перчаточном боксе OMNI-LAB (VAC) в атмосфере аргона. Циклическую вольтамперометрию (ЦВА) выполняли с использованием потенциостата PGSTAT302N + (Au-tolab, Утрехт, Нидерланды) в диапазоне 0,01–4,30 В со скоростью сканирования 0,5 мВ/с.

Результаты исследований и их обсуждение

Микрофотографии СЭМ поверхности образца на кремнии свидетельствуют об однородности покрытия без видимых дефектов (рис. 1). Кристаллических структур на поверхности и по объёму пленки не наблюдается.

Пленка системы Li-Ta-O растёт в соответствии с расчётной скоростью 0,21 нм/суперцикл (табл. 2). Стоит отметить, что плёнки имеют небольшую неравномерность по толщине, что скорее всего связано с особенностями роста литиевого реагента.

ЭДС анализ плёнок, находившихся в вакууме и на воздухе, был проведен для исследования стабильности покрытий (табл. 3). После нахождения на воздухе цвет плёнки остался неизменным, внешних признаков сильного гидролиза и/или карбонизации не наблюдалось, что говорит о химической стабильности покрытий при контакте с атмосферой.

При синтезе образцов серии планировалось получения соединения LiTaO₃ или его аналога, в котором соотношение Ta:O = 1:3. По ЭДС анализу соотношение Ta:O в полученных пленках

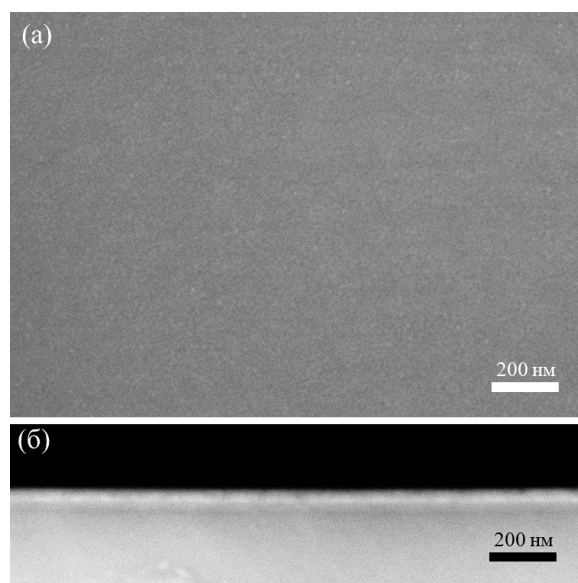


Рис. 1. Микрофотографии СЭМ а) поверхности и б) скола образца
 Fig. 1. SEM micrographs of a) a surface and b) a cross-section

было 1:4,5. Избыток кислорода связан с тем, что анализ СЭМ не позволяет детектировать литий, который вероятно так же образует оксиды.

Таблица 2

Параметры роста пленок Li-Ta-O

Table 2

Parameters of Li-Ta-O films growth

Соотношение Li:Ta	Количество суперциклов	Скорость роста, нм/цикл	Скорость роста, нм/суперцикл	Расчетная скорость роста, нм/суперцикл	Средняя толщина по эллипсометрии, нм
1:2	150	0,069	0,21	0,21	30,9

Таблица 3

Химический состав покрытия Li-Ta-O

Table 3

The chemical composition of the Li-Ta-O coating

Элемент	ЭДС		РФЭС
	ат. % (вакуум)	ат. % (воздух)	ат. % (поверхность)
Li	–	–	37,26
O	55,44	60,95	33,28
Si	32,3	26,44	–
Ta	12,26	12,61	2,65
C	–	–	26,80

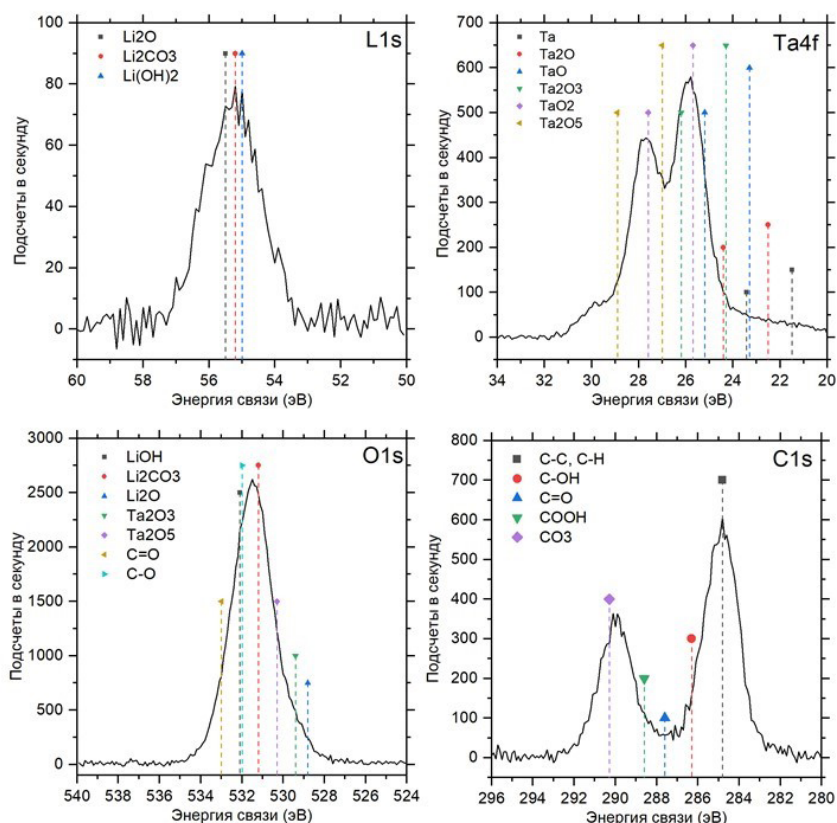


Рис. 2. РФЭС спектры поверхности пленки

Fig. 2. XPS spectra of the film surface

Для более подробного изучения химического состава плёнки были рассмотрены РФЭС спектры поверхности без травливания. На поверхности образца были обнаружены следующие элементы: литий, тантал, кислород и углерод (табл. 3). Углерод присутствует на поверхности в составе соединений, включающих группы C-OH, C-C и C-H, а также C=O связи (плечо пика 284,8 эВ). На 290 эВ имеется пик соответствующий CO_3 . Для спектра O1s виден один несимметричный максимум при 531,5 эВ, который близок к Ta_2O_5 (530,3 эВ). Анализ спектров Ta4f, показал наличие двух интенсивных пиков, положение максимумов которых хорошо совпадают с TaO_2 . Судя по спектрам O1s имеется соединение Ta_2O_5 . Данное несоответствие может быть вызвано сложностями в калибровке положения пиков (компенсации заряда). На спектрах Li1s обнаружен широкий максимум в области проявления соединений лития, характеризующий присутствие лития в различных соединениях: Li_2O , Li_2CO_3 , LiOH. Малая интенсивность и соотношение сигнал/шум спектров Li1s не позволяют выявить преимущественное состояние.

Рентгенофазовый анализ показал (рис. 3), что полученные пленки рентгеноаморфны, но, возможно, присутствие нанокристаллитов системы Ta-O (слабоинтенсивный пик в районе 27° и 62° , плечо при 33°). Интенсивный пик в районе 33° связан с дефектами кремниевой подложки.

Результаты циклической вольтамперометрии (ЦВА) и циклировании при различных токах разряда представлены на рис. 4. ЦВА кривые серии образцов и покрытий системы Li-Ta-O (рис. 4а) имеют общую тенденцию: в анодной области (3,0–0,1 В) имеются усиления тока, которые, скорее всего, связаны с образованием пенки SEI, а в катодной области потенциалов (4,3–3,0 В), усиления тока не наблюдается.

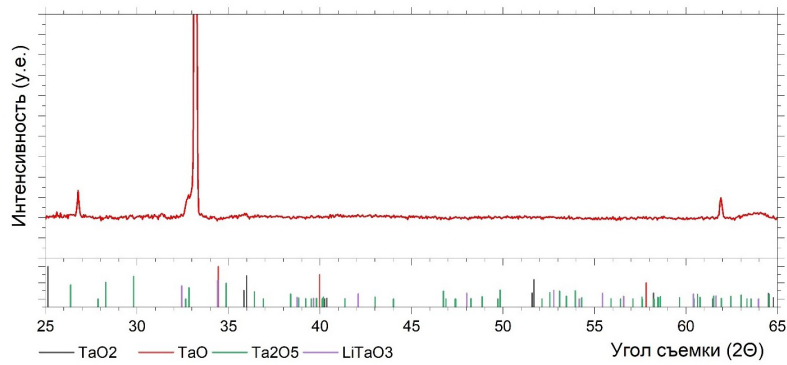


Рис. 3. Дифрактограмма образца Li-Ta-O
Fig. 3. XRD pattern of a Li-Ta-O sample

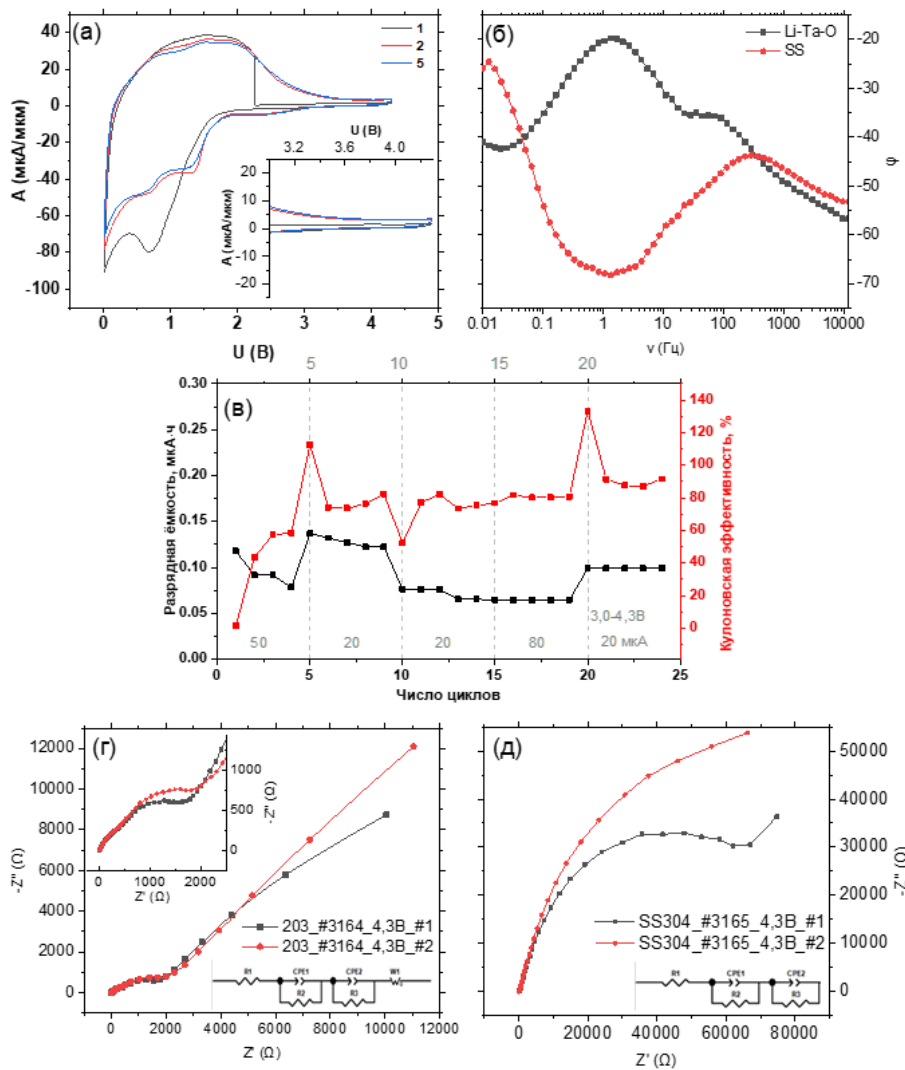


Рис. 4. а) ЦВА кривые; б) Кривые Боде на стальных электродах;
в) результаты циклических испытаний; г-д) диаграммы Найквиста и эквивалентные схемы
Fig. 4. а) CV curves; б) Bode Plot on steel electrodes;
в) the results of cyclic tests; г-д) Nyquist diagrams and equivalent circuits

Дальнейшее циклирование при токах от 20 до 80 мкА в катодной области потенциалов (4,3–3,0 В) показало наличие минимальной емкости 0,13–0,07 мкА·ч, соответственно, которая может быть связана адсорбцией носителей заряда на поверхности (рис. 4в). Таким образом, исследуемые покрытия системы Li-Ta-O не вносят значительного вклада в электрохимическую емкость в катодной области потенциалов, в которой в дальнейшем будут исследоваться тонкопленочные системы катод-твердый электролит.

Измерение импеданса для стальной подложки (SS) и синтезированной пленки (SS+Li-Ta-O) проводилось по двухэлектродной схеме в дисковых макетах CR2032 с литиевым противоэлектродом. Анализ кривых Бодэ (рис. 4б) показывает, что в высокочастотной области у обоих образцов есть общий пик в диапазоне частот 104–105 Гц, который, скорее всего, относится к процессам, связанным с формированием слоя SEI. Образцы SS имеют дополнительный пик в районе 1 Гц. Для пленок Li-Ta-O характерны два пика в диапазоне 10–100 Гц и 0,01–0,1 Гц, которые соответствуют наличию в этих частотах ёмкостно-резистивных откликов системы. Предполагается, что в исследуемых образцах нет индуктивных откликов (уравнение 1).

$$\operatorname{tg}\varphi = -\frac{1}{\omega RC}. \quad (1)$$

Это позволяет отобразить пики с использованием резисторов (R) и ёмкостных элементов (CPE). Для описания систем использовались параллельно соединённые CPE, R и элемент Варбурга (W). Кроме того, в начале добавляется активное сопротивление R1, которое представляет собой сумму омических сопротивлений электродов, электролита, а также корпуса измерительной ячейки. Из кривых Бодэ можно заключить, что для моделирования SS целесообразно выбрать двухэлементную схему, а для SS+Li-Ta-O – 3-х элементную.

Диаграммы Найквиста и эквивалентные схемы для исследуемых образцов представлены на рис. 4 г,д. Параметры элементов эквивалентных схем исследуемых образцов приведены в табл. 4.

Таблица 4

Параметры элементов эквивалентных схем

Table 4

Parameters of equivalent circuits elements

	R1, Ом	R2, Ом	R3, Ом	CPE1	CPE2
SS+Li-Ta-O	6	400	900	3E-6	8E-06
SS	3	100	0,15E6	2E-05	7,2E-5

Колебания R1 не относятся к исследуемому материалу, поэтому не рассматриваются для анализа. Стоит отметить, что второй элемент эквивалентных схем (CPE1/R2) у каждого из образцов описывает разные процессы, так как пики на диаграмме Бодэ находятся в разном диапазоне частот. Для пленки твердого электролита второй элемент описывает сопротивление переноса заряда и ёмкость двойного электрического слоя (ДЭС), тогда как на SS подобные процессы идти не могут. Сопротивление R3 для стальных электродов высокое, что говорит о том, что переноса заряда не происходит. Можно предположить, что на стали происходит медленное разложение электролита, и именно этот процесс соответствует второму элементу CPE1/R2.

Сопротивление плёнки SEI (R2) на стали меньше, чем на Li-Ta-O. Это может быть связано с условиями её образования: в то время как Li из покрытия твердого электролита может довольно легко взаимодействовать с электролитом с образованием SEI. Поверхность стали покрыта плотным слоем Cr_2O_3 , который, по-видимому, взаимодействует с электролитом по другому механизму.

Более высокая ёмкость как пленки SEI (CPE1), так и ДЭС (CPE2) для образцов SS может быть связана с большей шероховатостью её поверхности. Поверхность осаждённой пленки литированного оксида тантала имеет меньшую шероховатость и может считаться гладкой по сравнению со стальной поверхностью. В таком случае более шероховатая поверхность будет иметь большую площадь, и, как следствие, большую адсорбционную ёмкость.

Заключение

Исследование пленок твердого электролита системы Li-Ta-O, полученных методами АСО, показало, что рост пленок при заданных условиях соответствует теоретическому и составляет 0,21 нм/суперцикл. Пленки являются рентгеноаморфными с ближним порядком нанокристаллитов, соответствующих структуре Ta₂O₅. Согласно РФЭС смешанных оксидов системы Li-Ta-O в результате синтеза не образуется, так как присутствуют отдельные пики оксидов лития и оксидов тантала. Поверхность пленок однородная с небольшим содержанием соединений углерода. Однако при интегральном анализе элементного состава углеродсодержащих остатков прекурсора Ta(OEt)₅ не обнаружено. Анализ полученных циклических вольтамперограмм нанопленок, нанесенных на стальные подложки, показал, что покрытия в диапазоне потенциалов катода (4,3–3,0 В) не взаимодействуют с жидким электролитом и не вносят вклад в электрохимическую емкость и могут использоваться в качестве твердого электролита ТЛИА.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] **Ma Li J. et al.** Solid Electrolyte: the Key for High-Voltage Lithium Batteries // *Advanced Energy Materials*. 2014.
- [2] **Fleutot B. et al.** Characterization of all-solid-state Li/LiPONB/TiOS microbatteries produced at the pilot scale // *Journal of Power Sources*, 2011. 196 (23). Pp. 10289–10296.
- [3] **Chen R. et al.** Approaching Practically Accessible Solid-State Batteries: Stability Issues Related to Solid Electrolytes and Interfaces // *Chemical Reviews*. 2019.
- [4] **Sakamoto J.** More pressure needed // *Nature Energy*. 2019. 4 (10), pp. 827–828.
- [5] **Chen R.J. et al.** Addressing the Interface Issues in All-Solid-State Bulk-Type Lithium Ion Battery via an All-Composite Approach // *ACS Applied Materials & Interfaces*. 2017. 9 (11).
- [6] **Xu L. et al.** Interfaces in Solid-State Lithium Batteries // *Joule*. 2018.
- [7] **Ma C. et al.** Atomic-scale origin of the large grain-boundary resistance in perovskite Li-ion-conducting solid electrolytes // *Energy & Environmental Science*. 2014. 7 (5).
- [8] **Sakuda A., Hayashi A., Tatsumisago M.** Interfacial Observation between LiCoO₂ Electrode and Li₂S–P₂S₅ Solid Electrolytes of All-Solid-State Lithium Secondary Batteries Using Transmission Electron Microscopy // *Chemistry of Materials*. 2010. 22 (3), Pp. 949–956.
- [9] **Yamamoto K. et al.** Dynamic Visualization of the Electric Potential in an All-Solid-State Rechargeable Lithium Battery // *Angewandte Chemie International Edition*. 2010. 49 (26), Pp. 4414–4417.
- [10] **Chen C. et al.** Origin of Degradation in Si-Based All-Solid-State Li-Ion Microbatteries // *Advanced Energy Materials*. 2018.
- [11] **Chen R. et al.** The Thermal Stability of Lithium Solid Electrolytes with Metallic Lithium // *Joule*. 2020. 4 (4), pp. 812–821.
- [12] **Maximov M. et al.** Atomic Layer Deposition of Lithium–Nickel–Silicon Oxide Cathode Material for Thin-Film Lithium-Ion Batteries // *Energies*. 2020. 13 (9) 2345.
- [13] **George S.M.** Atomic Layer Deposition: An Overview // *Chemical Reviews*. 2010. 110 (1), P. 111–131.

[14] **Du M. et al.** Recent advances in the interface engineering of solid-state Li-ion batteries with artificial buffer layers: challenges, materials, construction, and characterization // *Energy & Environmental Science*. 2019. 12(6), Pp. 1780–1804.

[15] **Jadhav H.S. et al.** Highly stable bilayer of LiPON and B₂O₃ added Li_{1.5}Al_{0.5}Ge_{1.5}(PO₄)₂ solid electrolytes for non-aqueous rechargeable Li-O₂ batteries // *Electrochimica Acta*. 2016. 199, pp. 126–132.

[16] **Takada K. et al.** Interfacial modification for high-power solid-state lithium batteries // *Solid State Ionics*. 2008. 179 (27-32), pp. 1333–1337.

[17] **Takada K. et al.** Interfacial phenomena in solid-state lithium battery with sulfide solid electrolyte // *Solid State Ionics*. 2012. 225, pp. 594–597.

[18] ООО “ЭЛМОС”. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.metalorganics.ru/files/PR-ME-R/PR-TA1-R2.htm>

[19] **Kukli K., Ritala M., Leskelä M.** Atomic layer deposition and chemical vapor deposition of tantalum oxide by successive and simultaneous pulsing of tantalum ethoxide and tantalum chloride // *Chem. Mater.* 2000. Vol. 12, № 7. Pp. 1914–1920.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ВИШНЯКОВ Павел Сергеевич – лаборант, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, без степени.

E-mail: vishnyakovpaul@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4917-6632>

ПЭН Шэнцзе – ведущий научный сотрудник, Нанкинский университет авиации и космонавтики, без степени.

E-mail: pengshengjie@nuaa.edu.cn

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1591-1301>

МАКСИМОВ Максим Юрьевич – доцент, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, канд. техн. наук.

E-mail: maximspbstu@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7870-4751>

REFERENCES

[1] **J. Ma Li et al.**, Solid Electrolyte: the Key for High-Voltage Lithium Batteries // *Advanced Energy Materials*. 2014.

[2] **B. Fleutot et al.** Characterization of all-solid-state Li/LiPONB/TiOS microbatteries produced at the pilot scale // *Journal of Power Sources*, 2011. 196 (23). Pp. 10289–10296.

[3] **R. Chen et al.**, Approaching Practically Accessible Solid-State Batteries: Stability Issues Related to Solid Electrolytes and Interfaces // *Chemical Reviews*. 2019.

[4] **J. Sakamoto**, More pressure needed // *Nature Energy*. 2019. 4 (10), pp. 827–828.

[5] **R.J. Chen et al.**, Addressing the Interface Issues in All-Solid-State Bulk-Type Lithium Ion Battery via an All-Composite Approach // *ACS Applied Materials & Interfaces*. 2017. 9 (11).

[6] **L. Xu et al.**, Interfaces in Solid-State Lithium Batteries // *Joule*. 2018.

[7] **C. Ma et al.**, Atomic-scale origin of the large grain-boundary resistance in perovskite Li-ion-conducting solid electrolytes // *Energy & Environmental Science*. 2014. 7 (5).

- [8] **A. Sakuda, A. Hayashi, M. Tatsumisago**, Interfacial Observation between LiCoO₂ Electrode and Li₂S–P₂S₅ Solid Electrolytes of All-Solid-State Lithium Secondary Batteries Using Transmission Electron Microscopy // *Chemistry of Materials*. 2010. 22 (3), pp. 949–956.
- [9] **K. Yamamoto et al.**, Dynamic Visualization of the Electric Potential in an All-Solid-State Rechargeable Lithium Battery // *Angewandte Chemie International Edition*. 2010. 49 (26), pp. 4414–4417.
- [10] **C. Chen et al.**, Origin of Degradation in Si-Based All-Solid-State Li-Ion Microbatteries // *Advanced Energy Materials*. 2018.
- [11] **R. Chen et al.**, The Thermal Stability of Lithium Solid Electrolytes with Metallic Lithium // *Joule*. 2020. 4 (4), pp. 812–821.
- [12] **M. Maximov et al.**, Atomic Layer Deposition of Lithium–Nickel–Silicon Oxide Cathode Material for Thin-Film Lithium-Ion Batteries // *Energies*. 2020. 13 (9), 2345.
- [13] **S.M. George**, Atomic Layer Deposition: An Overview // *Chemical Reviews*. 2010. 110 (1), Pp. 111–131.
- [14] **M. Du et al.**, Recent advances in the interface engineering of solid-state Li-ion batteries with artificial buffer layers: challenges, materials, construction, and characterization // *Energy & Environmental Science*. 2019. 12 (6), pp. 1780–1804.
- [15] **H.S. Jadhav et al.**, Highly stable bilayer of LiPON and B₂O₃ added Li_{1.5}Al_{0.5}Ge_{1.5}(PO₄)₂ solid electrolytes for non-aqueous rechargeable Li–O₂ batteries // *Electrochimica Acta*. 2016. 199, pp. 126–132.
- [16] **K. Takada et al.**, Interfacial modification for high-power solid-state lithium batteries // *Solid State Ionics*. 2008. 179 (27–32), pp. 1333–1337.
- [17] **K. Takada et al.**, Interfacial phenomena in solid-state lithium battery with sulfide solid electrolyte // *Solid State Ionics*. 2012. 225, pp. 594–597.
- [18] OOO “ELMOS”. [Elektronnyy resurs]. URL: <http://www.metalorganics.ru/files/PR-ME-R/PR-TA1-R2.htm>
- [19] **K. Kukli, M. Ritala, M. Leskelä**, Atomic layer deposition and chemical vapor deposition of tantalum oxide by successive and simultaneous pulsing of tantalum ethoxide and tantalum chloride // *Chem. Mater.* 2000. Vol. 12, № 7. Pp. 1914–1920.

THE AUTHORS

VISHNIAKOV Pavel S. – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University*.
E-mail: vishnyakovpaul@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4917-6632>

PENG Shengjie – *Nanjing University of Aeronautics and Astronautics*.
E-mail: pengshengjie@nuaa.edu.cn
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1591-1301>

MAXIMOV Maxim Yu. – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University*.
E-mail: maximspbstu@mail.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7870-4751>

Статья поступила в редакцию 08.11.2021; одобрена после рецензирования 23.11.2021; принята к публикации 09.12.2021.

The article was submitted 08.11.2021; approved after reviewing 23.11.2021; accepted for publication 09.12.2021.