

ИССЛЕДОВАНИЕ ГРАФЕНОВЫХ АЭРОГЕЛЕЙ В КАЧЕСТВЕ ПОРИСТОЙ УГЛЕРОДНОЙ МАТРИЦЫ ДЛЯ ЛИТИЙ-СЕРНЫХ БАТАРЕЙ

Ф. Султанов^{1,2*}, А. Жайсанова^{1,3}, А. Ментбаева^{1,2}, Ж. Джакупова³

¹National Laboratory Astana, пр. Кабанбай батыра, 53, Астана, Казахстан

²Назарбаев Университет, пр. Кабанбай батыра, 53, Астана, Казахстан

³Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, ул. Кажымукана, 13, Астана, Казахстан

Аннотация

Литий-серные батареи являются системами хранения энергии нового поколения ввиду высокой теоретической емкости (1675 мАч/г), удельной энергоемкости (2600 Вт·ч·кг⁻¹) и безопасности эксплуатации. Более того, данный тип батарей привлекателен ввиду замены дорогостоящих катодных материалов на основе металлов (никель, кобальт) дешевой и доступной серой. Однако промышленное применение литий-серных батарей ограничено низкой электропроводимостью серы, растворением ее продуктов в электролите и объемным расширением при циклированном заряде-разряде батарей ввиду высокой разности плотностей серы и ее продуктов (полисульфиды лития). В работе показана возможность применения графеновых аэрогелей (ГА) в качестве пористой электропроводящей матрицы для иммобилизации серы с целью формирования катодов для литий-серных батарей. Разработанный катодный материал на основе графенового аэрогеля и серы показал высокое значение начальной разрядной емкости (1313 мАч/г) с ее средним снижением на 0,5% за 1 один цикл при 75 циклах заряд-разряда (0,1С). Полученные результаты показали, что графеновые аэрогели являются перспективными материалами для иммобилизации серы ввиду их высокой пористости, легковесности и электропроводимости.

Ключевые слова: графеновый аэрогель, сера, литий-серные батареи, разрядная емкость, полисульфиды лития.

1. Введение

В поисках устройств хранения энергии с более высокой удельной емкостью и низкой стоимостью внимание научного сообщества сосредоточилось на литий-серных (Li-S) батареях, которые имеют теоретическую емкость 1675 мАч/г и удельную энергоемкость 2600 Вт·ч·кг⁻¹ [1]. Однако для их коммерческого применения необходимо решить следующие проблемы: улучшить электрическую проводимость катода, поскольку сера и ее продукты являются слабыми проводниками, уменьшить объемное расширение во время циклической зарядке/разрядке [2, 3], возникающее из-за разницы в плотности Li₂S и серы (1,66 и 2,03

г/см³), и подавить эффект миграции полисульфидов лития к аноду (*polysulfide shuttle effect*), что негативно влияет на циклическую емкость и стабильность работы батарей [4, 5].

Для решения этих проблем впервые группой ученых под руководством L.F. Nazar было предложено смешивание серы с углеродными материалами, в частности с мезопористым углеродом CMK-3, который служил пористой матрицей для иммобилизации частиц серы с малой агломерацией [6]. В последствии огромное многообразие наноструктурированного углерода, таких как сферический углерод [7], мезопористый углерод [8], углеродные нанотрубки и нановолокна [9, 10], а также графен [11], было апробировано в качестве матриц

*Ответственный автор

E-mail: fail.sultanov@nu.edu.kz (Ф.П. Султанов)

для осаждения серы. Однако, как указывалось ранее, углерод обладает низкой полярностью и слабой способностью связывать полисульфиды, что приводит к незначительному снижению эффекта полисульфидного «шаттла» и слабой циклической стабильности батарей. Оксиды, сульфиды, нитриды и карбиды металлов, обладающие природной способностью химической адсорбции полисульфидов, также были изучены в качестве материалов для иммобилизации серы [12-15]. Установлено, что они существуют в форме агломерированных частиц и обладают плохой электропроводностью, что снижает их способность химически связывать полисульфиды.

В последнее время большое количество работ было направлено на получение композитов на основе полярных материалов и проводимого углерода [16-18]. Графеновые аэрогели (ГА) ввиду своей высокой электропроводности, удельной площади поверхности, способности к легированию гетероатомами (N_2), модификации наночастицами и иммобилизации серы при одностадийном процессе их гидротермального синтеза являются перспективными кандидатами для формирования углеродных матриц для серных катодов. Установлено, что структура ГА способна предоставить высоко проводящую сеть для быстрого переноса заряда, их отличные механические свойства позволяют снизить объемное расширение ячейки при заряде/разряде, а высокая пористость способствует иммобилизации и удержанию в порах большого количества серы (до $9,0 \text{ мг/см}^2$) [19-22].

Учитывая вышеизложенное, в рамках данного исследования были синтезированы трехмерные пористые системы на основе ГА, которые служили проводящей матрицей для иммобилизации серы и формирования серных катодов. Ячейка с катодным материалом на основе ГА/S показала высокое значение начальной разрядной емкости 1313 мАч/г со средним ее снижением на $0,5\%$ за 1 цикл при непрерывном циклировании.

2. Экспериментальная часть

2.1 Получение графеновых аэрогелей путем химического восстановления оксида графена

Синтез аэрогелей путем химического восстановления оксида графена был детально описан в нашей ранее опубликованной работе

[23]. Для получения аэрогелей на основе оксида графена $0,045 \text{ г}$ оксида графена диспергировали в 15 мл дистиллированной воды путем перемешивания на магнитной мешалке (200 об/мин) и ультразвуковой обработки в течение 40 мин (40 кГц). В полученную гомогенную дисперсию оксида графена добавляли этилендиамин, который служит восстановительным агентом (60 мкл) и источником азота при формировании ГА. Стекланный контейнер, содержащий водную дисперсию оксида графена с этилендиамином, плотно закрывали и подвергали нагреванию при температуре $95 \text{ }^\circ\text{C}$ в течение 12 ч , в результате которого происходило формирование трехмерной структуры графенового гидрогеля. Для полного удаления воды из структуры гидрогеля проводили его сублимационную сушку при $-5 \text{ }^\circ\text{C}$ в течение 24 ч , в результате которой был сформирован ГА.

2.2 Формирование катодов литий-серных батарей на основе ГА/S и сбор ячеек

Сера наносилась на полученную углеродную матрицу, представленную ГА, путем диффузии из расплава с образованием катодного материала для литий-серных батарей. Для этого полученный ГА и элементарная сера, растворенная в сероуглероде (CS_2), смешивались в соотношении $25:75$. Полученную смесь перемешивали и обрабатывали ультразвуком до полной ее гомогенизации. Затем полученный черный порошок нагревали при температуре $150 \text{ }^\circ\text{C}$ в течение 12 ч в атмосфере аргона, после чего температуру повышали до $200 \text{ }^\circ\text{C}$ и нагревали в течение 2 ч для полного плавления серы и удаления ее несвязанной с углеродом частью. Катоды на основе серы с ГА, действующим в качестве углеродной матрицы, были приготовлены с помощью нанесения тонкого слоя катодного материала на основу (*slurry casting*). 80% активного материала смешивали с 10% ацетиленовой сажи и 10% поливинилиденфторида (PVDF), растворенного в N-метил-2-пирролидоне (NMP). PVDF выступал в качестве связующего, а ацетиленовая сажа использовалась для создания дополнительных проводящих участков в структуре катода. Далее смесь активного материала с ацетиленовой сажой смешивали с растворенным PVDF и полученную суспензию наносили тонким слоем на алюминиевую фольгу, покрытую углеродом, с последующей сушкой при температуре $60 \text{ }^\circ\text{C}$ без вакуума в течение 10 мин , после чего создавали разность давления в вакуумной печи и суспензию су-

шили еще 4-6 ч. Литий-серная ячейка собиралась с использованием элементов типа 2032 в перчаточном ящике, заполненном аргоном. Катоды разрезали на диски диаметром 19 мм и помещали в катодную часть ячейки с последующим добавлением 20 мкл электролита, представленным литий бис-(трифторметансульфонил)имидом (LiTFSI) с 2% LiNO₃. Затем диск на основе сепаратора *Celgard 2400* того же размера помещали на катод и наносили на него дополнительно 20 мкл электролита. Диск из металлического Li использовался в качестве анода. Ячейка плотно закрывалась и сжималась в сборочном прессе.

2.3 Исследование образцов

Сканирующий электронный микроскоп марки *Quanta 3D 200i (FEI, USA)* (ускоряющее напряжение 15 кВ) применяли для исследования морфологии поверхности полученных образцов. Структурные характеристики образцов исследовались на просвечивающем электронном микроскопе (*JEM-2100, JEOL, Japan*). Исследования Раман-спектроскопии проводились

на Раман-спектрометре *NTEGRA SPECTRA™ (NT-MDT Spectrum)*, оснащенный твердотельным лазером с длиной волны возбуждения 473 нм. Исследование электрохимических характеристик ячеек проводили с помощью потенциостата-гальваностата *BioLogic VMP3* и тестера для батарей марки *Neware BT8.0.0.464*.

3. Результаты и обсуждение

3.1 Исследование ГА и катодных материалов на основе ГА/S

Методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) была изучена морфология поверхности аэрогелей на основе оксида графена. Из полученных снимков видно, что аэрогель представляет собой губчатую структуру с взаимосвязанными порами, размер которых варьируется в интервале от десятка до сотен микрометров (рис. 1 а-в). Каркас аэрогеля был сформирован в результате образования связей между слоями графена, а также пустотами между ними, которые формировались при заморозке гидрогеля перед сублимационной

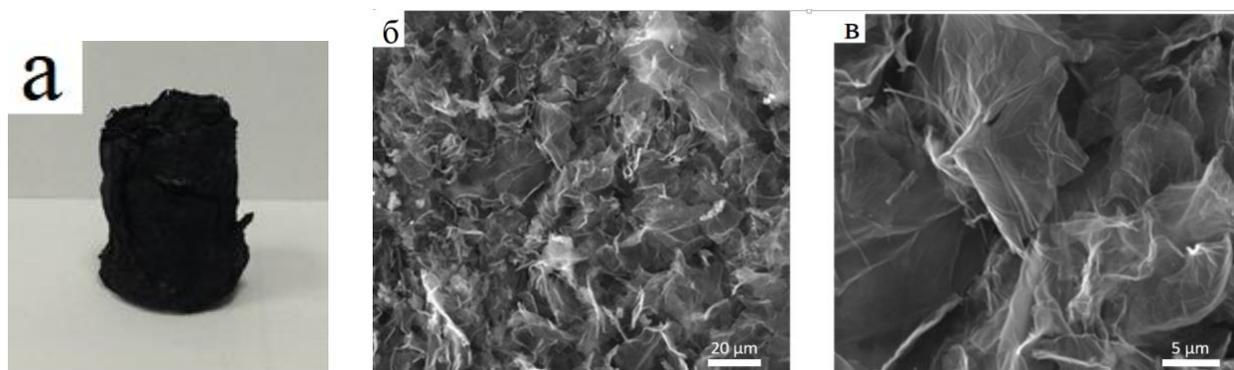


Рис. 1. Фотография (а) и СЭМ снимки ГА (б, в).

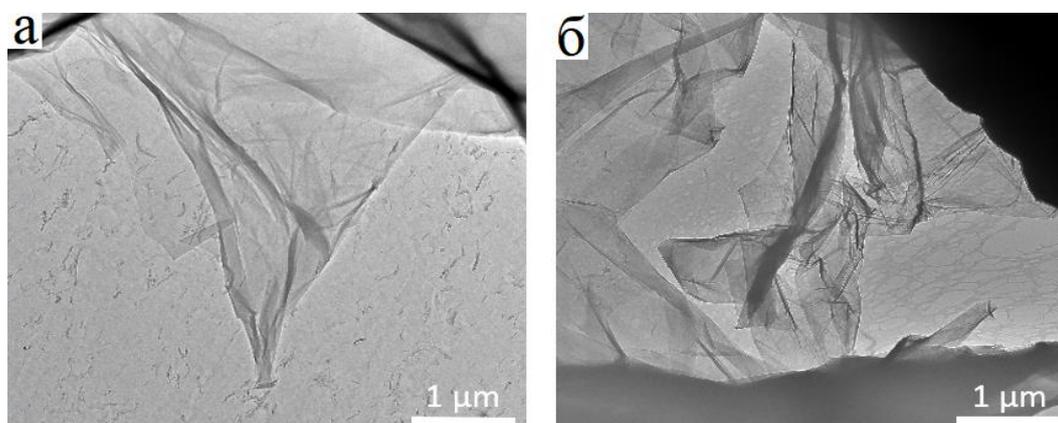


Рис. 2. Снимки ПЭМ слоев графена в ГА.

сушкой, которая способствовала образованию частиц льда.

Из снимков ПЭМ, представленных на рис. 2, наглядно видно наличие слоистой структуры графена. Светлые участки на снимках ПЭМ характеризуют наличие однослойного графена, в то время как более темные участки свидетельствуют о наложении слоев графена друг на друга, тем самым формируя более плотную слоистую структуру.

Для идентификации наличия графена в структуре ГА, а также описания его структурных характеристик было проведено исследование образцов Раман-спектроскопией. Раман-спектры обоих образцов, представленные на рис. 3 а, б, содержат характерные пики для графена в области 1580 и 1350 см^{-1} , относящиеся к G и D линиям, соответственно, которые

говорят о наличии sp^2 -графитизированного углерода в системе (пик G) и его дефектной структуре (пик D). Соотношение интенсивностей пика D к пику G (I_D/I_G), в среднем равные $0,78$ (рис. 3 а) и $1,05$ (рис. 3 б), свидетельствует о микрокристалличности образцов. Увеличение соотношения интенсивностей пиков D к G с $0,78$ до $1,05$ говорит о том, что при химическом восстановлении оксида графена средний размер доменов sp^2 -гибридизированного углерода снижается. Данное явление можно объяснить тем, что при химическом восстановлении гидроксогрупп оксида графена при гидротермальном синтезе аэрогелей происходит также частичное удаление связанных с ними атомов углерода, что усиливает дефектность системы и, соответственно, ведет к увеличению интенсивности пика D.

Иммобилизацию серы в структуру матрицы из ГА проводили методом диффузии из расплава. Для этого определенную навеску серы (соотношение серы к ГА составляло $75:25$) растворяли в сероуглероде, после чего пропитывали ГА данным раствором и нагревали при температуре 155 $^\circ\text{C}$ в течение 12 ч в инертной среде аргона. Для отделения несвязанной серы далее прогревали полученную смесь при 200 $^\circ\text{C}$ в течение 1 ч, в результате которого она испарялась.

На рис 4 представлен снимок ПЭМ ГА/S после процесса диффузии серы из расплава (рис. 4а). На поверхности графенового слоя видны темные неравномерные области, которые свидетельствуют об осаждении серы. Из результатов энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии, представленной на рис. 4 б-д, видно, что содержание серы составляет порядка 75 мас.%, при этом количество углерода составляет порядка 22 мас.%, что согласуется с начальными соотношением серы и углерода при иммобилизации серы диффузией из расплава. Более того, содержание кислорода в образце составляет $1,2$ мас.%, что может свидетельствовать о неполном химическом восстановлении оксида графена при гидротермальном синтезе аэрогеля.

3.2 Исследование электрохимических характеристик ГА/S

Как описывалось в экспериментальной части, нанесенные на алюминиевую фольгу катодные материалы на основе ГА/S разрезались на диски диаметром 19 мм и помещались в ячейку из нержавеющей стали типа 2031. На

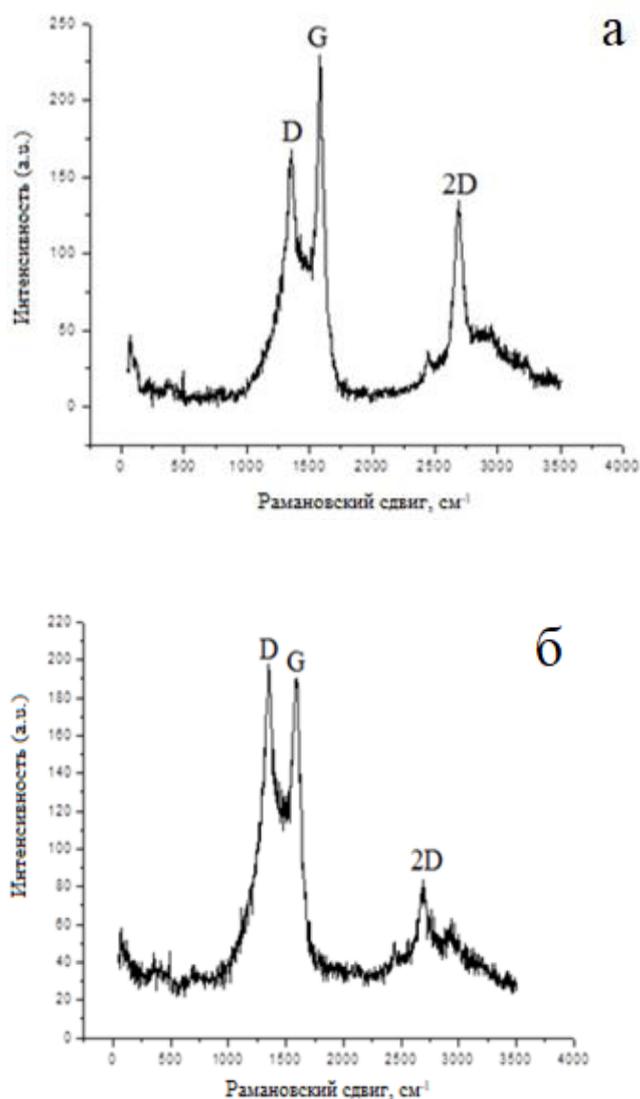


Рис. 3. Раман-спектры оксида графена (а) и восстановленного этилендиамином оксида графена (б).

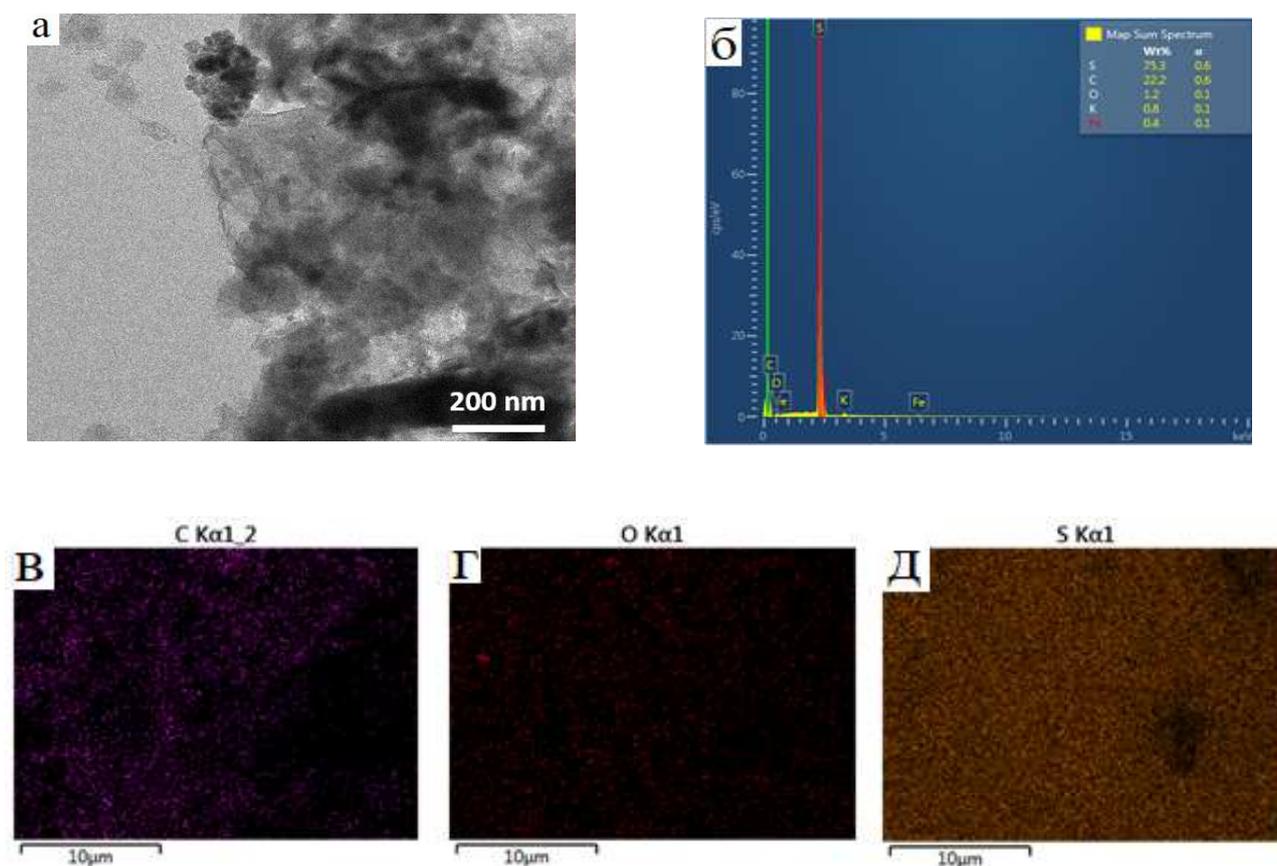


Рис. 4. Снимок ПЭМ (а), спектр энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии (б) и снимки элементного картирования элементов углерода, кислорода и серы (в-д) ГА/S.

его поверхность катодов наносился электролит (LiTFSI с 2% LiNO_3), после чего сверху положили коммерческий сепаратор (Celgard 2400), на поверхность которого также наносился электролит. В качестве анода использовали диски из металлического лития.

Электрохимические характеристики собранной ячейки с ГА/S катодом (загрузка серы на площадь катодного диска в среднем составляла $1,2 \text{ мг/см}^2$) были исследованы методом циклической вольтамперометрии (CV). На рис. 5а представлены типичные вольтамперные кривые для ГА/S катодов. Сформированные катоды сканировались со скоростью $0,1 \text{ мВ/с}$ от 1 до 3 В относительно потенциала Li/Li^+ . Для композита ГА/S при катодном сканировании наблюдались два катодных пика при 1,8 и 2,2 В. Пик при 2,2 В соответствует восстановлению серы до полисульфидов лития высокого порядка на основе механизма реакции элементарной серы. Пик при 1,8 В относится к восстановлению полисульфидов лития высокого порядка до $\text{Li}_2\text{S}_2/\text{Li}_2\text{S}$ низкого порядка [19]. Анодный пик для композита ГА/S наблюдался при 2,6 В, что соответствует реакциям окисления и конверсии полисульфидов. Воль-

тамперные кривые катода ГА/S перекрывают друг друга, что указывает на хорошую обратимость процесса (рис. 5а).

На рис. 5 б представлены значения циклического заряда-разряда сформированной ячейки на основе ГА/S при $0,1 \text{ С}$. Начальная разрядная емкость ячейки составляет 1313 мАч/г . По мере циклирования наблюдается снижение разрядной емкости, так в течение первых 10 циклов емкость батареи снизилась до 930 мАч/г . Далее наблюдается стабилизация батареи и значение Кулоновской эффективности в среднем составляет 95%. Значение разрядной емкости на 75-ом цикле составила 810 мАч/г . Рассчитанное среднее снижение разрядной емкости батареи составило 0,5% за 1 цикл заряда-разряда. Снижение емкости батареи при циклировании объясняется наличием эффекта полисульфидного челнока, т.е. растворением серы и ее продуктов в электролите, что говорит о неполной инкапсуляции серы в углеродную матрицу. Из гальваностатических кривых заряда и разряда батарей, представленных на рис. 5 в, видно, что первое плато разряда наблюдается при 2,4 В, формирование второго плато наблюдается при 2,1 В, что

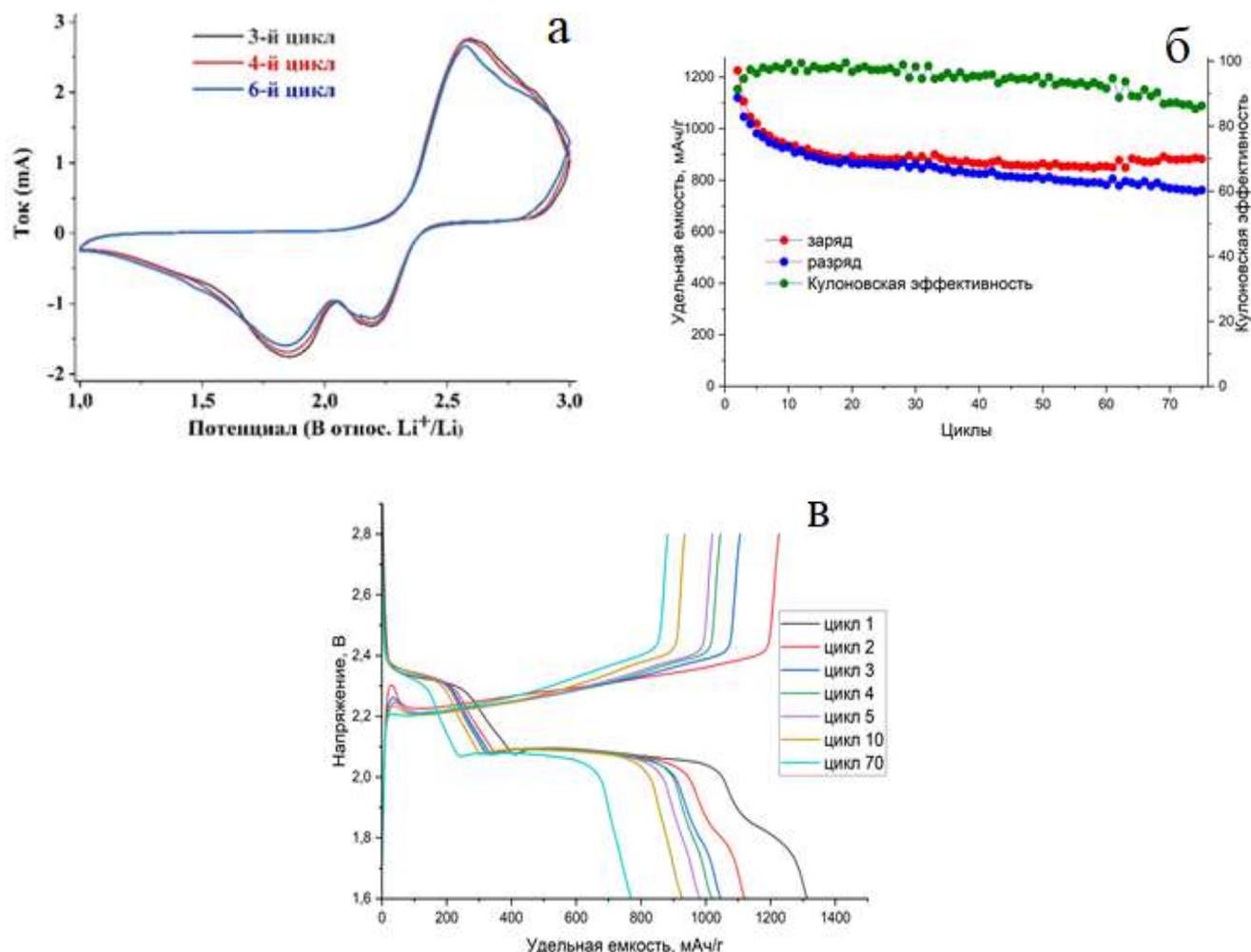


Рис. 5. Вольтамперные характеристики (а), циклические заряд-разрядные характеристики катодов ГА/S (б) и гальваностатические заряд-разрядные кривые (в).

говорит о механизме прохождения электрохимической реакции восстановления серы до полисульфидов лития высшего и низшего порядков, соответственно. Плато заряда наблюдается в интервале 2,2 и 2,3 В, что свидетельствует об обратимой реакции восстановления полисульфидов лития до серы в ходе электрохимической реакции.

4. Заключение

В рамках проведенного исследования были синтезированы аэрогели путем химического восстановления оксида графена. Полученные аэрогели характеризуются слоистой пористой структурой. Сера была иммобилизована на поверхность аэрогелей методом диффузии из расплава с соотношением углерода к сере равным 75:25. Собранные ячейки на основе катод-

ных материалов показали значение начальной разрядной емкости 1313 мАч/г при 0,1 С при среднем количестве загрузки серы 1,2 мг/см². В ходе циклирования ячейки было установлено, что на 75 цикле значение разрядной емкости батареи составило 810 мАч/г, при этом среднее значение потери емкости батареи составило 0,5% на 1 цикл. Наблюдаемое снижение разрядной емкости батареи можно объяснить эффектом полисульфидного челнока, т.е. растворением серы и ее продуктов в электролите, что ведет к потере активного материала. Данный эффект обусловлен неполным инкапсулированием серы в сформированную углеродную матрицу. Тем не менее, полученные результаты подтверждают перспективность применения трехмерных пористых систем на основе графена в качестве углеродной матрицы для осаждения серы.

Благодарность

Работа выполнена при финансовой поддержке Комитета науки МОН РК по грантовому проекту AP13067625 «Синтез и исследование композитных аэрогелей на основе оксида графена и максенов (MXene) для литий-серных батарей».

Литература

- [1]. Ma L, Hendrickson K, Wei Sh, Archer L (2015) *Nano Today* 10(3):315-338. DOI:10.1016/j.nantod.2015.04.011
- [2]. Fang R, Zhao Sh, Sun Zh, Wang D-W, Cheng H-M, Li F (2017) *Adv. Mater.* 29(48):1606823. DOI:10.1002/adma.201606823
- [3]. Wang D-W, Zeng Q, Zhou G, Yin L, Li F, Cheng H-M, Gentle I, Lu G-Q (2013) *J. Mater. Chem. A* 1(33):9382. DOI:10.1039/C3TA11045A
- [4]. Hofmann AF, Fronczek DN, Bessler WG (2014) *Journal of Power Sources* 259:300-310. DOI:10.1016/j.jpowsour.2014.02.082
- [5]. Guo J, Xu Y, Wang C (2011) *Nano Lett.* 11(10):4288-4294. DOI:10.1021/nl202297p
- [6]. Ji X, Lee KT, Nazar LF (2009) *Nature Mater.* 8:500-506. DOI:10.1038/nmat2460
- [7]. Zhang C, Wu HB, Yuan C, Guo Z, Lou XWD (2012) *Angew. Chem. Int. Ed.* 51:9592-9595. DOI:10.1002/anie.201205292
- [8]. Zhang J., Yang C-P, Yin Y-X, Wan L-J, Guo Y-G (2016) *Adv. Mater.* 28:9539-9544. DOI:10.1002/adma.201602913
- [9]. Ma L, Zhuang Y-G, Wei S, Hendrickson KE, Kim MS, Cohn G, Hennig RG, Archer LA (2016) *ACS Nano*. 10:1050-1059. DOI:10.1021/acsnano.5b06373
- [10]. Zu C, Fu Y, Manthiram A (2013) *J. Mater. Chem. A* 1:10362. DOI:10.1039/c3ta11958k
- [11]. Zhang Z, Kong L-L, Liu S, Li G-R, Gao X-P (2017) *Adv. Energy Mater.* 7:1602543. DOI:10.1002/aenm.201602543
- [12]. Ma L, Chen R, Zhu G, Hu Y, Wang Y, Chen T, Liu J, Jin Z (2017) *ACS Nano* 11:7274-7283. DOI:10.1021/acsnano.7b03227
- [13]. Pu J, Shen Z, Zheng J, Wu W, Zhu C, Zhou Q, Zhang H, Pan F (2017) *Nano Energy* 37:7-14. DOI:10.1016/j.nanoen.2017.05.009
- [14]. Deng D-R, Xue F, Jia Y-J, Ye J-C, Bai C-D, Zheng M-S, Dong Q-F (2017) *Co₄N ACS Nano* 11:6031-6039. DOI:10.1021/acsnano.7b01945
- [15]. Fang R, Zhao S, Sun Z, Wang D-W, Amal R, Wang S, Cheng H-M, Li F (2018) *Energy Storage Materials* 10:56-61. DOI:10.1016/j.ensm.2017.08.005
- [16]. Rehman S, Guo S, Hou Y (2016) *Adv. Mater.* 28:3167-3172. DOI:10.1002/adma.201506111
- [17]. Li Z, Zhang J, Guan B, Wang D, Liu L-M, Lou XW (2016) *Nat Commun.* 7:13065. DOI:10.1038/ncomms13065
- [18]. Li S, Cen Y, Xiang Q, Aslam MK, Hu B, Li W, Tang Y, Yu Q, Liu Y, Chen C (2019) *J. Mater. Chem. A* 7:1658-1668. DOI:10.1039/C8TA10422K
- [19]. Cheng D, Wu P, Wang J, Tang X, An T, Zhou H, Zhang D, Fan T (2019) *Carbon* 143:869-877. DOI:10.1016/j.carbon.2018.11.032
- [20]. Li B, Xiao Q, Luo Y (2018) *Materials & Design* 153:9-14. DOI:10.1016/j.matdes.2018.04.078
- [21]. Cavallo C, Agostini M, Genders JP, Abdelhamid ME, Matic A (2019) *Journal of Power Sources* 416:111-117. DOI:10.1016/j.jpowsour.2019.01.081
- [22]. Gómez-Urbano JL, Gómez-Cámer JL, Botas C, Rojo T, Carriazo D (2019) *Journal of Power Sources* 412:408-415. DOI:10.1016/j.jpowsour.2018.11.077
- [23]. Sultanov F, Bakbolat B, Daulbayev Ch, Urazgalieva A, Azizov Z, Mansurov Z, Pei SS (2016) *Combustion and Plasma Chemistry*. 14(2):105-112

Investigation of graphene aerogels as a porous carbon matrix for lithium-sulfur batteries

F. Sultanov^{1,2*}, A. Zhaisanova^{1,3}, A. Mentbayeva^{1,2}, Zh. Dzhakupova³

¹National Laboratory Astana, 53, Kabanbay Batyr ave., Astana, Kazakhstan

²Nazarbayev University, 53, Kabanbay Batyr ave., Astana, Kazakhstan

³L.N. Gumilyov Eurasian National University, 13, Kazhymukan str., Astana, Kazakhstan

Abstract

Lithium-sulfur batteries are a new generation of energy storage systems due to their high theoretical capacity (1675 mAh/g), specific energy consumption (2600 W·h·kg⁻¹) and operational safety. Moreover, this type of batteries is attractive in view of the replacement of expensive metal-based cathode materials (nickel, cobalt) with cheap and available sulfur. However, the industrial use of lithium-sulfur batteries is limited by the low electrical conductivity of sulfur, the dissolution of its products in the electrolyte, and the volumetric expansion during cyclic charge-discharge of batteries due to the high density difference between sulfur and its products (lithium polysulfides). This paper demonstrates the possibility of using graphene-based aerogels

as a porous electrically conductive matrix for sulfur immobilization in order to form cathodes for lithium sulfur batteries. The developed cathode material based on graphene aerogel and sulfur demonstrated a high value of the initial discharge capacity (1313 mAh/g) with its average decrease by 0.5% per 1 cycle during 75 charge-discharge cycles (0.1 C). The obtained results demonstrate that graphene-based aerogels are promising materials for sulfur immobilization due to their high porosity, light weight, and electrical conductivity.

Keywords: graphene aerogel, sulfur, lithium-sulfur batteries, discharge capacity, lithium polysulfides.

Графен аэрогельдерін литий-күкіртті батареяларға арналған кеуекті көміртекті матрица ретінде зерттеу

Ф. Султанов^{1,2*}, А. Жайсанова^{1,3}, А. Ментбаева^{1,2}, Ж. Джакупова³

¹National Laboratory Astana, Қабанбай батыр даңғ., 53, Астана, Қазақстан

²Назарбаев Университеті, Қабанбай батыр даңғ., 53, Астана, Қазақстан

³Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Қажымұқан көшесі, 13, Астана, Қазақстан

Аңдатпа

Литий-күкіртті батареялар жоғары теориялық сыйымдылығы (1675 мАсағ/г), меншікті энергия сыйымдылығы (2600 Вт·сағ·кг⁻¹) және

пайдалану қауіпсіздігіне байланысты энергия сақтау жүйесінің жаңа буыны болып табылады. Сонымен қатар, батареялардың бұл түрі қымбат металл негізіндегі катодтық материалдарды (никель, кобальт) арзан және қолжетімді күкіртпен алмастыру тұрғысынан тартымды. Алайда, литий-күкіртті батареяларды өнеркәсіпте пайдалану күкірттің төмен электр өткізгіштігімен, оның өнімдерінің электролитте еруімен және күкірт пен оның өнімдері (литий полисульфидтері) арасындағы тығыздықтың жоғары айырмашылығына байланысты батареялардың циклдік заряд-разряды кезінде көлемдік кеңеюімен шектеледі. Жұмыста литий күкіртті батареялар үшін катодтарды қалыптастыру мақсатында күкіртті иммобилизациялау үшін кеуекті электр өткізгіш матрица ретінде графен аэрогельдерін пайдалану мүмкіндігі көрсетілген. Графен аэрогелі мен күкірт негізінде әзірленген катодты материал 75 заряд-разряд циклінің (0,1С) 1 циклінде оның орташа 0,5%-ға төмендеуімен бастапқы разряд сыйымдылығының жоғары мәнін (1313 мАсағ/г) көрсетті. Алынған нәтижелер графен аэрогельдерінің жоғары кеуектілігіне, жеңіл салмағына және электр өткізгіштігіне байланысты күкіртті иммобилизациялау үшін перспективті материалдар екенін көрсетті.

Кілт сөздер: графен аэрогелі, күкірт, литий-күкіртті батареялар, разрядтық сыйымдылық, литий полисульфидтері.