

УДК 544.636/.638

ВЛИЯНИЕ СОСТАВА ЭЛЕКТРОЛИТА НА ПАРАМЕТРЫ АККУМУЛЯТОРА СИСТЕМЫ ПОЛИИМИД–ЛИТИЙ¹

© 2021 г. Г. Р. Баймуратова^{a, *}, А. В. Мумятов^a, Р. Р. Капаев^{a, b},
П. А. Трошин^a, О. В. Ярмоленко^{a, **}

^aИнститут проблем химической физики РАН

просп. академика Семенова, 1, Черноголовка, Московская обл., 142432 Россия

^bСколковский институт науки и технологии, Сколковский инновационный центр
Сколково, здание 3, Москва, 143026 Россия

*e-mail: guzalia.rb@yandex.ru

** e-mail: oyarm@icp.ac.ru

Поступила в редакцию 03.05.2020 г.

После доработки 11.09.2020 г.

Принята к публикации 14.02.2021 г.

Изучено влияние состава жидкого апротонного электролита на работу Li-аккумулятора с полиимидным (PI) катодом. В качестве электролитных систем использовали: 1 М LiN(CF₃SO₂)₂ (LiTFSI) в смеси диоксолан/диметоксиэтан (2 : 1) и 1 М LiPF₆ в смеси этиленкарбонат/диметилкарбонат (1 : 1). Ячейки Li//PI были исследованы методами циклической вольтамперометрии (ЦВА), электрохимической импедансной спектроскопии с лестничной разверткой потенциала и гальваностатическим циклированием. Методом электрохимического импеданса в ячейках Li//Li показано, что сопротивление твердоэлектролитного слоя на границе с литиевым электродом в LiPF₆-электролите на порядок больше, чем для границы с LiTFSI-электролитом. Метод сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) подтверждает образование этого слоя и на PI-катоде. Методом ЦВА показано, что состав электролита сильно влияет на обратимость окислительно-восстановительных процессов. При циклировании прототипов Li//PI-аккумуляторов лучшие показатели по стабильности разрядной емкости у прототипа с LiTFSI-электролитом, что говорит о перспективности данного состава для Li-полиимидной системы.

Ключевые слова: апротонные электролиты, полиимидный катод, литиевый аккумулятор, электрохимический импеданс, циклическая вольтамперометрия, циклирование

DOI: 10.31857/S0424857021070033

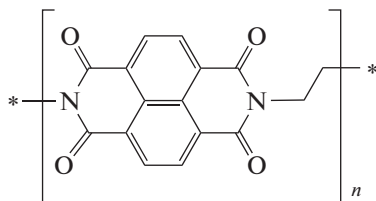
ВВЕДЕНИЕ

Интерес к разработке новых органических электроактивных материалов за последнее время сильно возрос благодаря их экологичности, доступности, высокой удельной емкости и гибкости [1–3]. Полиимиды с функциональными карбонильными группами, способными обратимо присоединять ионы лития, являются перспективным классом органических электроактивных соединений вследствие сочетания высокой емкости, стабильности при циклическом заряде/разряде и достаточно высокого потенциала разряда [4]. Полиимиды получили широкое распространение как технический пластик с хорошими механическими свойствами и с высокой термостабильностью.

Их синтезируют по реакции поликонденсации диангидридов с диаминами. Полиимиды подвергаются двум обратимым окислительно-восстановительным (редокс) процессам с участием двух одноэлектронных этапов восстановления с образованием анион-радикала и дианиона, соответственно. Первое восстановление полностью обратимо, тогда как второе может приводить к сильной трансформации структуры. Поэтому в процессах хранения заряда желательно использовать только первую окислительно-восстановительную стадию. В качестве активных материалов органических аккумуляторов изучено несколько различных полиимидов, полученных методом поликонденсации из диангидрида 1,4,5,8-нафталинтетракарбонической кислоты и соответствующих диаминов [4–10]. Среди них можно выделить полиимид PI [9–15] с “устойчивой” по отношению к редокс-превращениям структурой ввиду при-

¹ По материалам доклада на 15-м Международном совещании “Фундаментальные проблемы ионники твердого тела”, Черноголовка, 30.11.–07.12.2020.

сутствия этиленового $-C_2H_4-$ мостика между димидными звеньями, в то время как у структуры нафталиндиимида со связью N—N в ходе литирования происходит восстановительная фрагментация основной полимерной цепи [16] с дальнейшим растворением низкомолекулярных фрагментов.



Структура полиимида PI.

Ранее было показано [17], что, несмотря на то, что данный полиимид обладает более “устойчивой” структурой, во время циклирования ячейки Li//PI в электролите состава 1 М LiPF₆ в смеси этиленкарбонат/диметилкарбонат (1 : 1) происходит сильное падение разрядной емкости – на 40% за 100 циклов. Введение LiPF₆-электролита в матрицу на основе сополимера поливинилиденфторида с гексафторпропиленом улучшило стабильность емкости [18], но возникли диффузионные ограничения величины тока заряда–разряда.

В работе [4] показаны хорошие результаты по стабильности емкости во время циклирования ячейки Li//PI в электролите состава 1 М LiN(CF₃SO₂)₂ в смеси диоксолан/диметоксиэтан (2 : 1), но большинство работ по исследованию органических катодов проводятся в LiPF₆-электролитах с карбонатными растворителями. Поэтому возникла необходимость сравнительного изучения влияния этих двух составов на работу Li//PI-ячеек. Исследование проводили методами ЦВА, СЭМ, электрохимической импедансной спектроскопии и гальваностатического циклирования.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Компоненты электродов и электролитов

В качестве анодов использовали прокатанную литиевую фольгу производства ОАО “Литий-элемент” (Саратов). Все работы с литием проводили в аргоновом боксе MBraun (Германия).

Компоненты катода: полиимид PI, сажа марки Timcal Super C65 (MTI Corporation); полимерное связующее поливинилидендифторид (ПВДФ) марки HSV 900 (KynarFlex).

Полиимид PI был синтезирован по методике (схема 1), подробно описанной в работе [18].

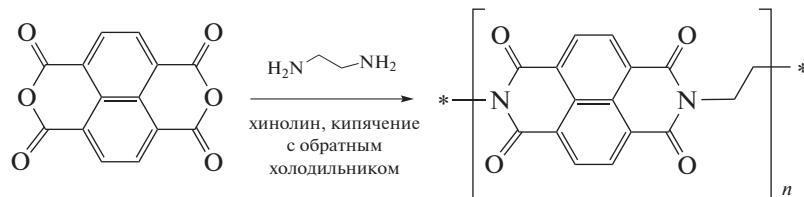


Схема 1. Синтез полиимида PI.

Составы жидких электролитов: 1) 1 М LiPF₆ в смеси этиленкарбонат/диметилкарбонат (ЭК/ДМК) (1 : 1); 2) 1 М LiTFSI в смеси диоксолан/диметоксиэтан (ДОЛ/ДМЭ) (2 : 1).

Методика приготовления PI-анода

Состав катода PI: сажа: ПВДФ = 45 : 45 : 10 мас. %. В боксе готовили раствор ПВДФ в N-метилпирролидоне (NMP), из расчета 1.5 мл растворителя на 0.2 г катодного материала, перемешивая смесь 24 ч при 50°C на магнитной мешалке до полного растворения полимера. Затем катодную массу наносили на алюминиевую подложку ($d = 20$ мкм) с помощью прибора Doctor Blade и сушили при нагревании 150°C в течение 4 ч для удаления растворителя (определяется визуально). Затем катоды прессовали на вальцах. Прессованные катоды сушили в сушильном шкафу в течение 10 ч при температуре 120°C для полного удаления остатков

растворителя NMP. Загрузка полиимида составила около 0.15 мг/см².

Оборудование

Сборку прототипов Li//PI-аккумуляторов и Li//Li-ячеек дискового типа CR2032 проводили в аргоновом перчаточном боксе MBraun (Германия).

Катод сушили в сушильном шкафу марки ТЕРМИКС СНОЛ-3,5.3,5.3,5/3,5-И5М (Россия).

Для измерения методом электрохимического импеданса в симметричных ячейках Li//Li использовали импедансметр Z-2000 фирмы Electrochemical Instruments – Elins (Россия) (интервал частот 1 Гц–2 МГц) с амплитудой сигнала 10 мВ. Результаты измерений обрабатывали по программе ZView2.

Изучение прототипов Li//PI-аккумуляторов методом электрохимического импеданса с лест-

ничной разверткой потенциала (staircase potentiometric electrochemical impedance spectroscopy, **SPEIS**) проводили на станции BioLogic VMP3 в диапазоне частот 500 кГц–10 мГц с амплитудой сигнала 10 мВ. Первый цикл измерений импеданса прототипа аккумулятора (процесс литирования) проводили от значения напряжения разомкнутой цепи (**НРЦ**) 2.3 до 1.5 В с шагом 38 мВ. После первого цикла измерений каждый прототип аккумулятора выдерживали в течение 2 ч, **НРЦ** при этом непрерывно увеличивалось с 1.5 до 1.75 В. Второй цикл измерений (процесс делитирования) проводили от **НРЦ** = 1.75 до 3.5 В с шагом 35 мВ. Перед измерением каждого спектра импеданса прототипы аккумуляторов выдерживали в течение 15 мин. Спектры записывались с коррекцией дрейфа.

Циклические вольтамперограммы снимали на потенциостате Potentiostat P-2X (Elins, Россия) при скорости развертки 0.1–1.0 мВ/с.

Тестирование прототипов литий-органических аккумуляторов проводили на приборе “Batteries Testing System” марки **BTS 5V10mA** (с ограничением по потенциалу 5 В и по току – 10 мА) фирмы Shenzhen Neware electronic Co., LTD (Китай) в гальваностатическом режиме при различ-

ных значениях тока. Ток заряда/разряда рассчитывали из теоретического значения удельной емкости с учетом массы полиимида на электроде ($m_{\text{акт}}$):

$$C/n = (C_{\text{теор}} m_{\text{акт}}) / n,$$

где n – количество ионов Li^+ , участвующих в редокс-процессе. $C_{\text{теор}} = 183$ мА ч/г – теоретическая емкость 2-электронного перехода.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На первом этапе работы было проведено исследование прототипов **Li//PI**-аккумуляторов методом ЦВА.

Каждое мономерное звено в полиимиде может теоретически подвергаться 4-электронному восстановлению, принимая 4 иона лития. При этом теоретическая удельная емкость увеличивается в 2 раза до ~366 мА ч/г, по сравнению с 2-электронным процессом. Но на практике в основном реализуется только 2-электронный окислительно-восстановительный процесс (схема 2), что было показано экспериментально и теоретически с помощью квантово-химических расчетов [17–21].

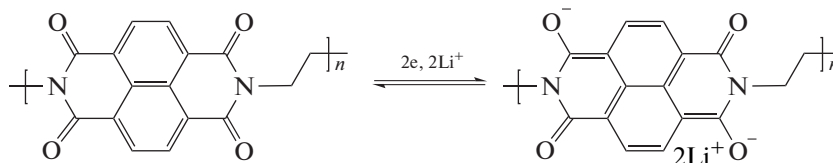


Схема 2. Электрохимическое восстановление и окисление полиимида PI.

На рис. 1 представлены вольт-амперные характеристики полиимидного катода в двух составах жидкого электролита: а) 1 М LiPF_6 в ЭК/ДМК (1 : 1) и б) 1 М LiTFSI в ДОЛ/ДМЭ (2 : 1) в диапазоне потенциалов 1.5–3.5 В отн. Li^+/Li . **Li//PI**-ячейки были протестированы при разных скоростях развертки потенциала, но наилучшее разрешение пиков для полиимидного катода наблюдалось при скорости 0.1 мВ/с для ячейки с LiPF_6 -электролитом и 1.0 мВ/с для LiTFSI -электролита.

Из рис. 1 видно, что для ЦВА полиимидного катода в LiPF_6 -электролите характерно смещение второго и последующего цикла, что вероятно относится к структурной перестройке активного катодного материала [18], в то время как для LiTFSI -электролита этого не наблюдается. Кроме этого, расстояние между анодными и катодными пиками 2-электронных редокс-процессов для PI (схема 2) в LiTFSI -электролите составляет 0.23 и 0.30 В, в то время как для LiPF_6 -электролита 0.70 и 0.54 В, что свидетельствует о том, что в LiTFSI -электролите обратимость редокс-процессов выше, которая проявляется даже при более

высокой (на порядок) скорости развертки потенциала.

Кроме того, в LiPF_6 -электролите 2-электронный процесс литирования полиимида (рис. 1а) имеет 2 разрешенных пика, пики делитирования сливаются в один. В LiTFSI -электролите (рис. 1б) наблюдается обратная картина – облегчен процесс делитирования.

На рис. 2 представлены кривые заряда–разряда PI-катода с LiPF_6 -электролитом (а) и с LiTFSI -электролитом (б) в диапазоне 1.5–3.5 В при значении тока заряда–разряда $C/5$.

Из рис. 2 видно, что кривые заряда–разряда PI-катода в разных электролитах немного отличаются друг от друга.

Следующим этапом исследования было изучение сопротивления на межфазной границе литий/электролит в симметричных ячейках с двумя литиевыми электродами. Электрохимический импеданс ячеек был измерен через сутки после сборки. Результаты представлены на рис. 3.

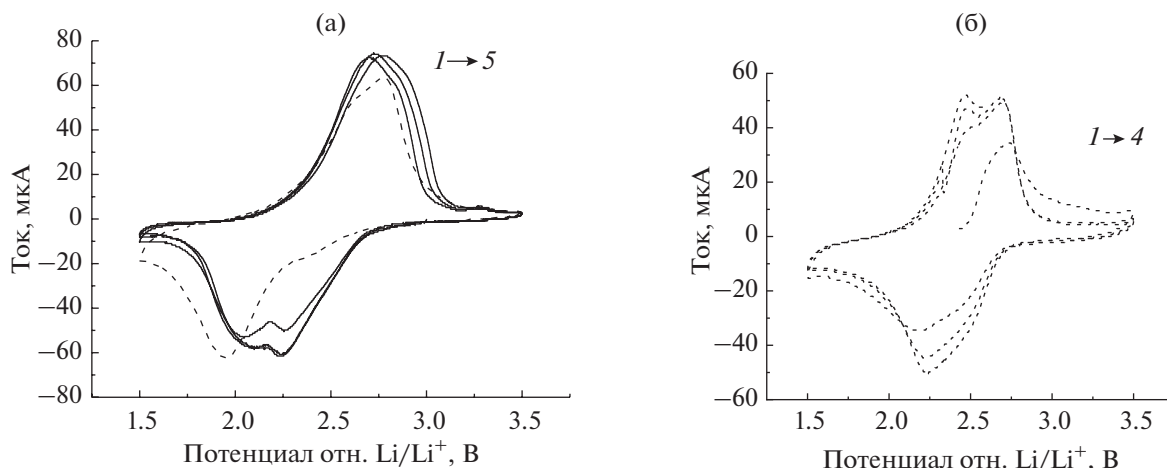


Рис. 1. ЦВА полиимидного катода в электролитах: а) 1 М LiPF₆ в ЭК/ДМК (1 : 1); б) 1 М LiTFSI в ДОЛ/ДМЭ (2 : 1) в диапазоне 1.5–3.5 В отн. Li⁺/Li при скорости сканирования 0.1 и 1 мВ/с соответственно. Первый цикл (рис. 1а) обозначен пунктирной линией.

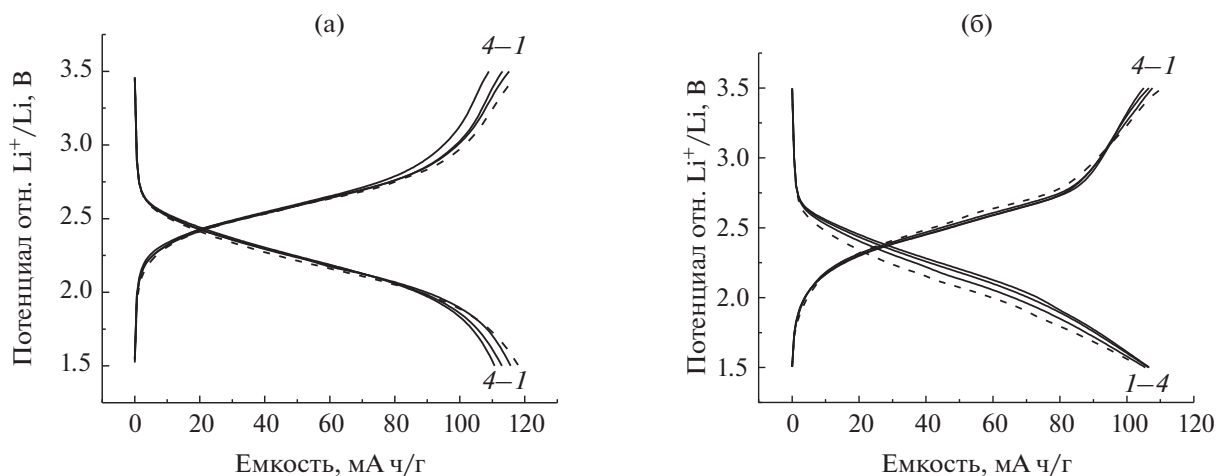


Рис. 2. Кривые заряда–разряда полиимидного катода в электролитах: а) 1 М LiPF₆ в ЭК/ДМК; б) 1 М LiTFSI в ДОЛ/ДМЭ в диапазоне 1.5–3.5 В при значении тока заряда–разряда C/5. Первый цикл обозначен пунктирной линией.

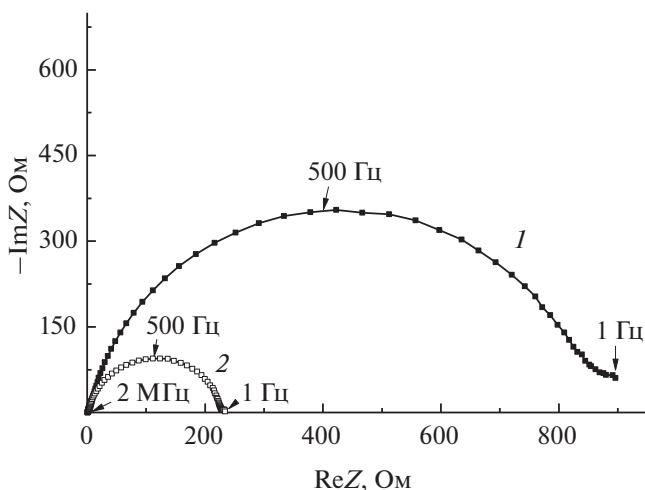


Рис. 3. Годографы импеданса ячейки Li/Li, где (1) – электролит 1 М LiPF₆ в ЭК/ДМК (1 : 1); (2) – 1 М LiTFSI в ДОЛ/ДМЭ (2 : 1).

Из рис. 3 видно, что в LiPF₆-электролите сопротивление поверхностного слоя составляет 880 Ом, а в LiTFSI-электролите всего 230 Ом, что в 4 раза меньше. Это свидетельствует о том, что на поверхности лития в 1 М LiPF₆ в ЭК/ДМК (1 : 1) образуется твердоэлектролитный слой (solid electrolyte interphase, SEI) с большим сопротивлением, чем в 1 М LiTFSI в ДОЛ/ДМЭ (2 : 1).

Было проведено изучение зависимости удельной емкости прототипов Li//PI-аккумуляторов с разными электролитами от значения тока заряда/разряда (C/5, C/2, 1 C, C/5) (рис. 4).

Из рис. 4 видно, что емкость при всех скоростях выше с LiTFSI-электролитом (среднее значение емкости при C/5, C/2 и 1 C – 125, 90 и 67 мА ч/г, соответственно). Кроме того, возврат к первоначальному значению тока C/5 показал, что прототип аккумулятора с LiPF₆-электролитом полностью деградировал и не восстанавливается, а

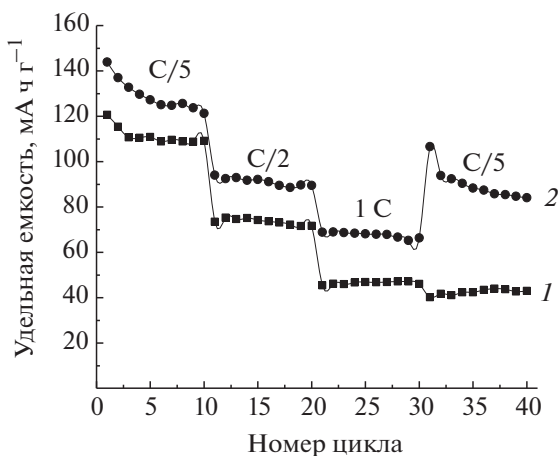


Рис. 4. Зависимость удельной емкости от значения тока заряда–разряда прототипа аккумулятора с электролитами: (1) – 1 М LiPF₆ в ЭК/ДМК (1 : 1); (2) – 1 М LiTFSI в ДОЛ/ДМЭ (2 : 1).

наоборот, происходит дальнейшее падение емкости до 42 мА ч/г. В LiTFSI-электролите при возвращении к значению тока C/5 емкость увеличивается до 90 мА ч/г.

Прототипы аккумуляторов после предварительных испытаний на заряд–разряд были исследованы методом электрохимического импеданса с лестничной разверткой потенциала. На рис. 5 приведены годографы SPEIS при литировании и делитировании прототипа с LiTFSI-электролитом после 200 циклов заряда–разряда и прототипа с LiPF₆-электролитом после 26 циклов заряда–разряда.

Из рис. 5 видно, что годографы SPEIS прототипов аккумуляторов с разными составами электролитов сильно отличаются друг от друга. Из рис. 5а, 5б видно, что на границе электрод/электролит (вероятнее всего, с металлическим лити-

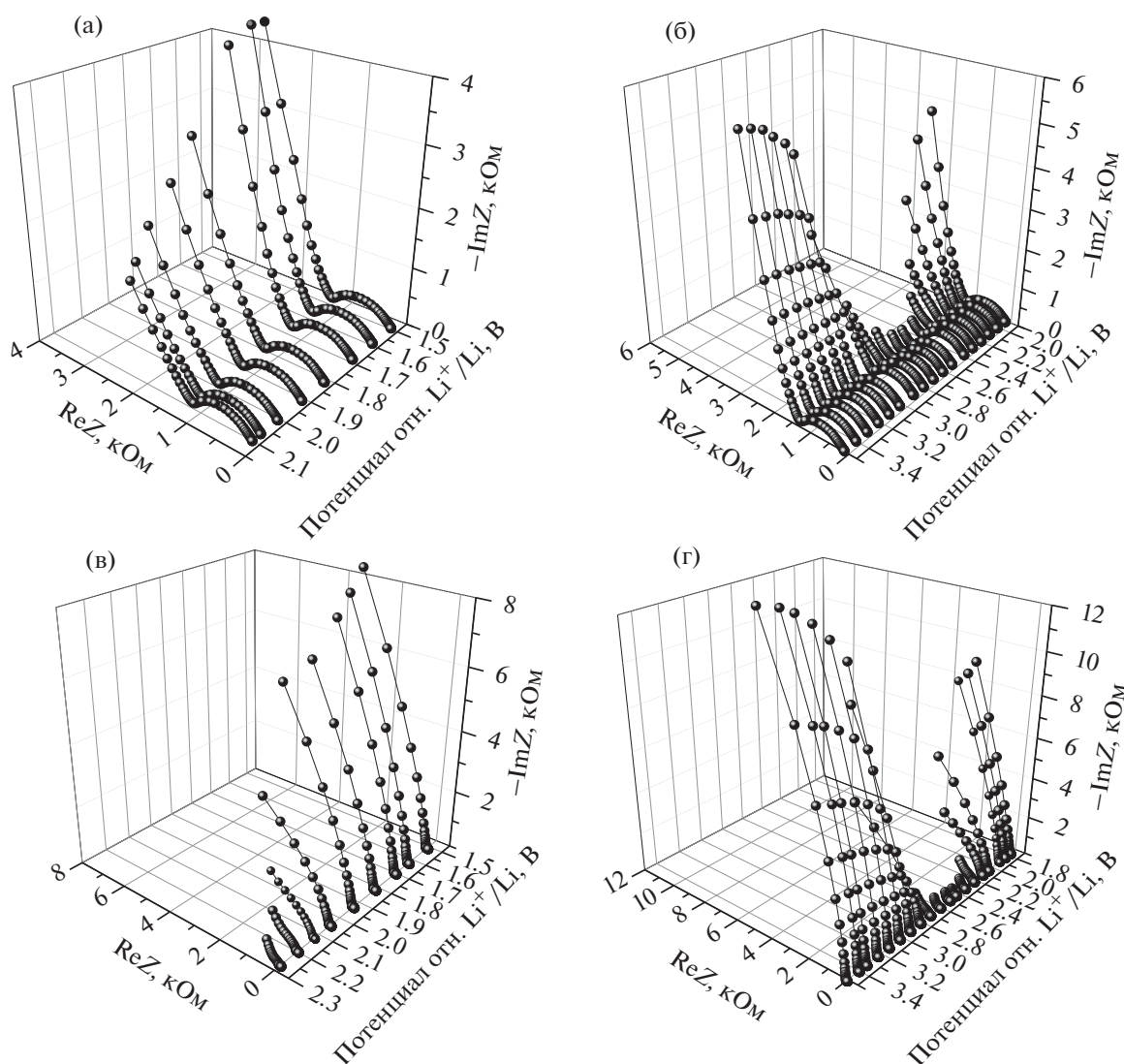


Рис. 5. Годографы SPEIS для прототипов Li//PI-аккумуляторов с 1 М LiPF₆ в ЭК/ДМК (1 : 1) (а, б); с 1 М LiTFSI в ДОЛ/ДМЭ (2 : 1) (в, г), где (а, в) – процесс литирования; (б, г) – процесс делитирования.

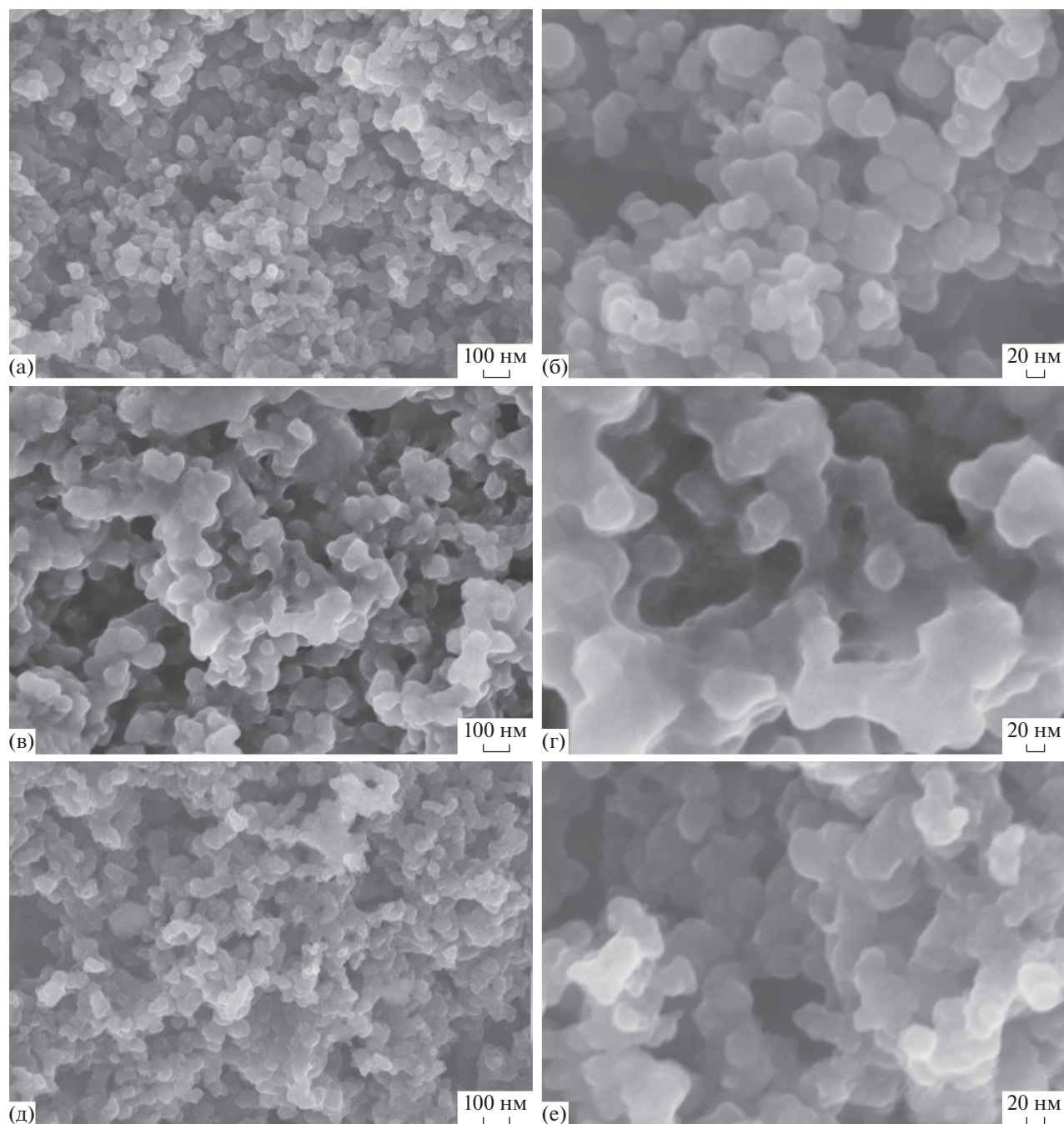


Рис. 6. СЭМ микрофотографии катодного материала (сканирующий автоэмиссионный электронный микроскоп ZEISS LEO SUPRA 25), где (а, б) – исходный катод; (в, г) – после циклирования в 1 М LiPF₆ в ЭК/ДМК (1 : 1); (д, е) – после циклирования в 1 М LiTFSI в ДОЛ/ДМЭ (2 : 1). Масштаб 100 и 20 нм.

ем, см. рис. 3) сформировался SEI с большим сопротивлением ~ 1100 Ом, в то время как для границы с LiTFSI-электролитом (рис. 5в, 5г) SEI имеет сопротивление на порядок меньше (~ 100 Ом). Изменения годографов импеданса в низкочастотной области имеют аналогичный характер зависимости от внедренного лития в катод, но в случае LiTFSI-электролита (рис. 5в, 5г)

эта зависимость выражена сильнее (см. масштаб по оси ReZ). Механизм этого процесса можно объяснить следующим образом. Литирование катодного материала – это вынужденный (затратный по энергии) процесс, и профиль годографа в низкочастотной области, относящийся к электродному процессу, изменяется плавно (рис. 5а, 5в). При делитировании (выгодный процесс) граница стано-

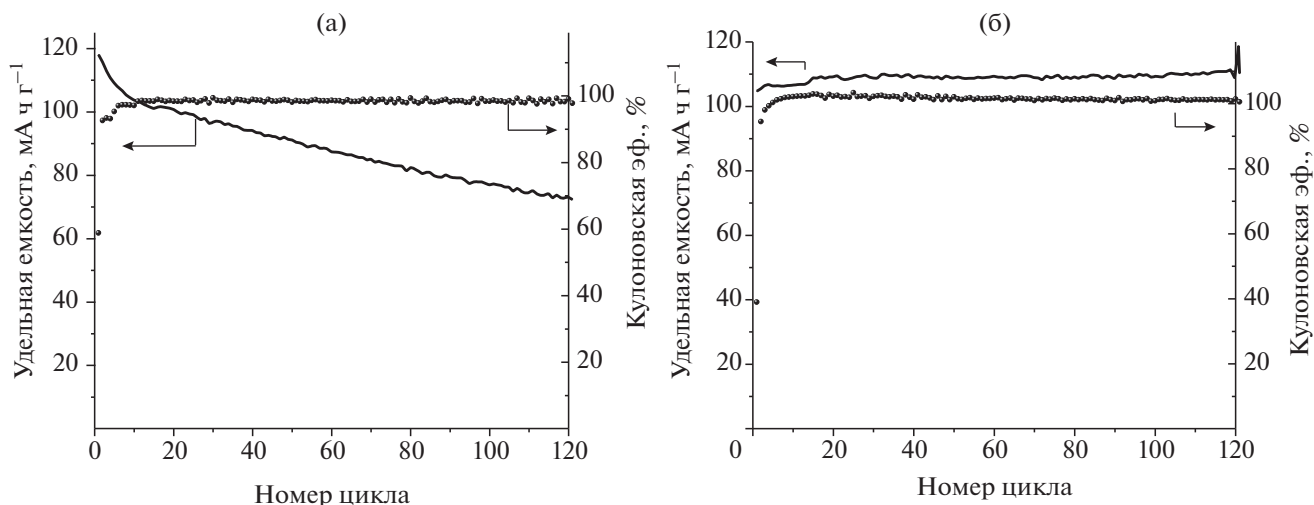


Рис. 7. Зависимость разрядной емкости и кулоновской эффективности прототипов Li//PI-аккумуляторов от номера цикла для 1 М LiPF₆ в ЭК/ДМК (а) и с 1 М LiTFSI в ДОЛ/ДМЭ (б) при значении тока заряда–разряда C/5. Диапазон напряжений 1.5–3.5 В отн. Li⁺/Li.

вится все более проводящей, и в области потенциалов 2.8–2.2 В прототип аккумулятора выходит на плато разряда (см. рис. 2) без диффузионных ограничений, это характеризуется исчезновением импеданса Варбурга. При дальнейшем делитировании катода (3.5 В) его материал постепенно становится “непроводящим” и снова возникают диффузионные ограничения (рис. 5б, 5г).

Было проведено исследование поверхности полиимидных катодов до и после циклирования методом СЭМ (рис. 6). Катоды после вскрытия дисковых элементов промывали этиловым спиртом и тщательно сушили.

Из рис. 6 видно, что катод во время циклирования в 1 М LiPF₆ в ЭК/ДМК (1 : 1) также покрывается толстым слоем SEI, в отличие от электролита 1 М LiTFSI в ДОЛ/ДМЭ (2 : 1), где этот слой визуально меньше.

Были проведены ресурсные испытания прототипов Li//PI-аккумуляторов с разными электролитами в течение 120 циклов заряда–разряда. На рис. 7 приведены зависимости разрядной емкости и кулоновской эффективности прототипов аккумуляторов от номера цикла для обоих электролитов.

Из рис. 7 видно, что в течение 120 циклов заряда–разряда прототипов аккумуляторов в LiPF₆-электролите происходит падение емкости с 118 мА ч/г почти на 45%, в то время как емкость ячейки с LiTFSI-электролитом стабильна и равна 110 мА ч/г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследовано влияние состава электролита на работу прототипа Li-аккумулятора с полиимидным катодом. Особый интерес представляет

электролит 1 М LiTFSI в смеси диоксолан/диметоксиэтан (2 : 1), который предлагается для системы Li//PI взамен 1 М LiPF₆ в смеси этиленкарбонат/диметилкарбонат (1 : 1).

Показано, что в LiPF₆-электролите как на поверхности литиевого анода, так и на поверхности полиимидного катода образуется непроводящий, объемный слой SEI, что сильно ухудшает стабильность емкости при циклировании, в то время как для прототипа аккумулятора с LiTFSI-электролитом данных процессов не происходит.

Таким образом, показано, что состав 1 М LiTFSI в смеси диоксолан–диметоксиэтан (2 : 1) является перспективным электролитом для Li//PI-аккумуляторов, который способствует образованию тонких и проводящих слоев SEI на границе с обоими электродами, что стабилизирует процессы заряда–разряда. Эти данные подтверждаются и в других работах [4, 22] по исследованию органических катодов разного состава с LiTFSI-электролитами как в смеси растворителей диоксолан–диметоксиэтан [4], так и в смеси этиленкарбонат–диэтилкарбонат [22]. Данный эффект в первую очередь связан с преимуществами соли LiTFSI с точки зрения безопасности, ионной проводимости и термостабильности по сравнению с обычно используемой солью LiPF₆ [23], а также участия анионов TFSI⁻ в образовании более качественного и стабильного межфазного твердого электролита – SEI [24, 25].

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят с. н. с., к. ф.-м. н. Дремову Надежду Николаевну (АЦКП ИПХФ РАН) за исследование поверхности катодов методом СЭМ.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при поддержке Государственного задания № АААА-А19-119071190044-3.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Friebe, C., Lex-Balducci, A., and Schubert, U.S., Sustainable Energy Storage: Recent Trends and Developments toward Fully Organic Batteries, *Chem. Sus. Chem.*, 2019, vol. 12, p. 4093.
2. Oubaha, H., Gohy, J.-F., and Melinte, S., Carbonyl-Based π -Conjugated Materials: From Synthesis to Applications in Lithium-Ion Batteries, *Chem. Plus. Chem.*, 2019, vol. 84, p. 1179.
3. Haupler, B., Wild, A., and Schubert, U.S., Carbonyls: Powerful Organic Materials for Secondary Batteries, *Adv. Energy Mater.*, 2015, vol. 5, p. 1402034.
4. Song, Z., Zhan, H., and Zhou, Y., Polyimides: Promising Energy-Storage Materials, *Angew. Chem., Int. Ed.*, 2010, vol. 49, p. 8444.
5. Luo, J., Zhu, Y.N., Yan, C., Long, X.-Y., Lu, S., Liu, S.-P., and Ge, M.-Q., Preparation of Organic Polymer Cathode Materials for Amide Lithium-ion Battery Anode and Their Electrochemical Performance, *Acta Polym. Sin.*, 2017, vol. 4, p. 633.
6. Reiner, B.R., Foxman, B.M., and Wade, C.R., Electrochemical and structural investigation of the interactions between naphthalene diimides and metal cations, *Dalton T.*, 2017, vol. 46, iss. 29, p. 9472.
7. Schon, T.B., Tilley, A.J., Kynaston, E.L., and Seferos, D.S., Three-Dimensional Arylene Diimide Frameworks for Highly Stable Lithium Ion Batteries, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2017, vol. 9, no. 18, p. 15631.
8. Sharma, P., Damien, D., Nagarajan, K., Shaijumon, M.M., and Hariharan, M., Perylene-polyimide-based organic electrode materials for rechargeable lithium batteries, *J. Phys. Chem. Lett.*, 2013, vol. 4, p. 3192.
9. Chen, C., Zhao, X., Li, H.-B., Gan, F., Zhang, J., Dong, J., and Zhang, Q., Naphthalene-based Polyimide Derivatives as Organic Electrode Materials for Lithium-ion Batteries, *Electrochim. Acta*, 2017, vol. 229, p. 387.
10. Chen, L., Li, W., Wang, Y., Wang, C., and Xia, Y., Polyimide as anode electrode material for rechargeable sodium batteries, *RSC Adv.*, 2014, vol. 4, p. 25369.
11. Dong, X., Yu, H., Ma, Y., Bao, J., Truhlar, D.G., Wang, Y., and Xia, Y., All-Organic Rechargeable Battery with Reversibility Supported by "Water-in-Salt" Electrolyte, *Chem. Eur. J.*, 2017, vol. 23, p. 2560.
12. Song, Z., Xu, T., Gordin, M.L., Jiang, Y.B., Bae, I.T., Xiao, Q., Zhan, H., Liu, J., and Wang, D., Polymer-graphene nanocomposites as ultrafast-charge and -discharge cathodes for rechargeable lithium batteries, *Nano Lett.*, 2012, vol. 12, p. 2205.
13. Chen, L., Bao, J.L., Dong, X., Truhlar, D.G., Wang, Y., Wang, C., and Xia, Y., Aqueous Mg-Ion Battery Based on Polyimide Anode and Prussian Blue Cathode, *ACS Energy Lett.*, 2017, vol. 2, p. 1115.
14. Gheyhani, S., Liang, Y., Wu, F., Jing, Y., Dong, H., Rao, K.K., Chi, X., Fang, F., and Yao, Y., An Aqueous Ca-Ion Battery, *Adv. Sci.*, 2017, vol. 4, p. 1700465.
15. Huang, Y., Li, K., Liu, J., Zhong, X., Duan, X., Shakir, I., and Xu, Y., Three-dimensional graphene/polyimide composite-derived flexible high-performance organic cathode for rechargeable lithium and sodium batteries, *J. Mater. Chem. A*, 2017, vol. 5, p. 2710.
16. Shestakov, A.F., Yarmolenko, O.V., Ignatova, A.A., Mumyatov, A.V., Stevenson, K.J., and Troshin, P.A., Structural origins of the capacity fading in the lithium-polyimide battery, *J. Mater. Chem. A*, 2017, vol. 5, p. 6532.
17. Shestakov, A.F., Romanuyk, O.E., Mumyatov, A.V., Luchkin, S.Yu., Slesarenko, A.A., Yarmolenko, O.V., Stevenson, K.J., and Troshin, P.A., Theoretical and experimental evidence for irreversible lithiation of conformationally flexible polyimide: impact on the battery performance, *J. Electroanal. Chem.*, 2019, vol. 836, p. 143.
18. Ярмоленко, О.В., Романюк, О.Е., Слесаренко, А.А., Баймуратова, Г.Р., Шувалова, Н.И., Мумятов, А.В., Трошин, П.А., Шестаков, А.Ф. Особенности работы Li-полиимидного аккумулятора с различными типами электролитов. *Электрохимия*. 2019. Т. 55. С. 394. [Yarmolenko, O.V., Romanyuk, O.E., Slesarenko, A.A., Baymuratova, G.R., Shuvalova, N.I., Mumyatov, A.V., Troshin, P.A., and Shestakov, A.F., Performance of a Li-Polyimide Battery with Electrolytes of Various Types, *Russ. J. Electrochem.*, 2019, vol. 55, p. 254.]
19. Liang, Y., Zhang, P., and Chen, J., Function-oriented design of conjugated carbonyl compound electrodes for high energy lithium batteries, *Chem. Sci.*, 2013, vol. 4, p. 1330.
20. Lv, M., Zhang, F., Wu, Y., Chen, M., Yao, C., Nan, J., Shu, D., Zeng, R., Zeng, H., and Chou, S.-L., Heteroaromatic organic compound with conjugated multicarbonyl as cathode material for rechargeable lithium batteries, *Sci. Rep.*, 2016, vol. 6, p. 23515.
21. Hernández, G., Casado, N., Coste, R., Shanmukaraj, D., Rubatat, L., Armand, M., and Mecerreyes, D., Redox-active polyimide-polyether block copolymers as electrode materials for lithium batteries, *RSC Adv.*, 2015, vol. 5, p. 17096.
22. Xu, Z., Ye, H., Li, H., Xu, Y., Wang, C., Yin, J., and Zhu, H., Enhanced Lithium-Ion Storage Performance of Tannic Acid in LiTFSI Electrolyte, *ACS Omega*, 2017, vol. 2, p. 1273.
23. Kalthoff, J., Bresser, D., Bolloli, M., Alloin, F., Sanchez, J.-Y., and Passerini, S., Enabling LiTFSI-based electrolytes for safer lithium-ion batteries by using linear fluorinated carbonates as (Co) solvent, *ChemSusChem*, 2014, vol. 7, p. 2939.
24. Lewandowski, A. and Świdarska-Mocek, A., Ionic liquids as electrolytes for Li-ion batteries—An overview of electrochemical studies, *J. Power Sources*, 2009, vol. 194, p. 601.
25. Lahiri, A., Borisenko, N., Borodin, A., Olschewski, M., and Endres, F., Characterisation of the solid electrolyte interface during lithiation/delithiation of germanium in an ionic liquid, *Phys. Chem. Chem. Phys.*, 2016, vol. 18, p. 5630.