

Report D4.1 (M9)

Názov projektu:	Materiály pre vylepšenie bezpečnosti Li-ion batérií
Akronym:	ENSAMAT
TRL:	1-3
Kód:	09I04-03-V02-00028
Začiatok projektu:	1.1.2025
Doba trvania	20 mesiacov

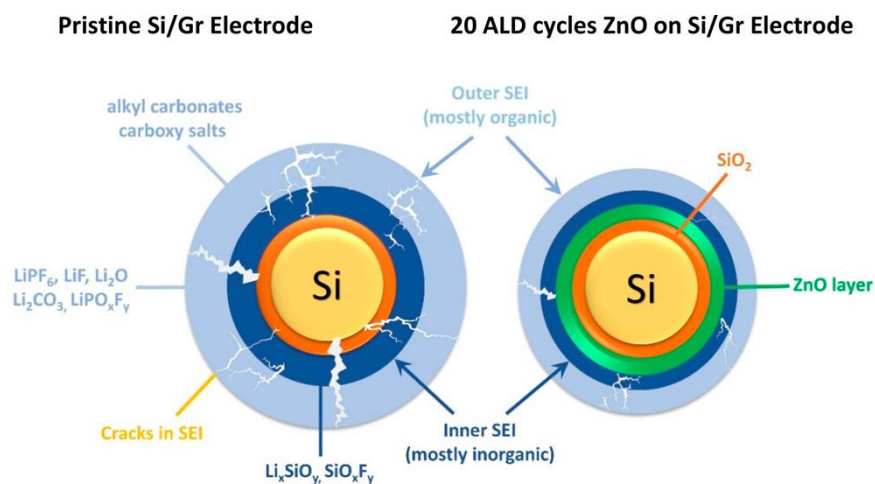
Deliverable number	Deliverable	Work package code	Entity responsible for deliverable	Type	Access and dissemination	Method of verification	Delivery (project implementation month)
D4.1	Properties of selected electrodes and batteries	WP4	SUT	Report	P	Experimental results	M9

Report M1-M12 (D4.1)

Tento výstup sa zameriava na vlastnosti vybraných elektród a batérií, so špeciálnym dôrazom na ich štruktúru, morfológiu a elektrochemické správanie. Cieľom je poskytnúť základy na pochopenie vzťahu medzi charakteristikami materiálu a výkonom článku prostredníctvom systematickej charakterizácie. Práca sa realizuje v rámci úlohy 4.1 (Štrukturálna, morfológická a elektrochemická charakterizácia) a úlohy 4.2 (Pokročilá elektrická a elektrochemická charakterizácia). Štrukturálna a morfológická analýza je kombinovaná s elektrochemickými metódami na posúdenie rozhraní medzi elektródou a elektrolytom, ako aj transportných a kinetických procesov počas cyklovania. Na vyhodnotenie difúzie iónov, procesov prenosu náboja a celkovej elektrochemickej odozvy vybraných half-cell a full-cell článkov sa používajú pokročilé techniky, ako je elektrochemická impedančná spektroskopia (EIS) a galvanostatická intermitentná titračná technika (GITT). Okrem toho sa impedančné dáta analyzujú pomocou náhradného elektrického modelu (ECM), ktorý umožňuje získať kľúčové elektrické parametre popisujúce skúmané batérie. Výsledky poskytujú základné poznatky nevyhnutné na hlbšie pochopenie skúmaných elektrochemických systémov a vytvárajú základ pre ďalšie úlohy projektu.

Úloha 4.1 (Štrukturálna, morfológická a elektrochemická charakterizácia)

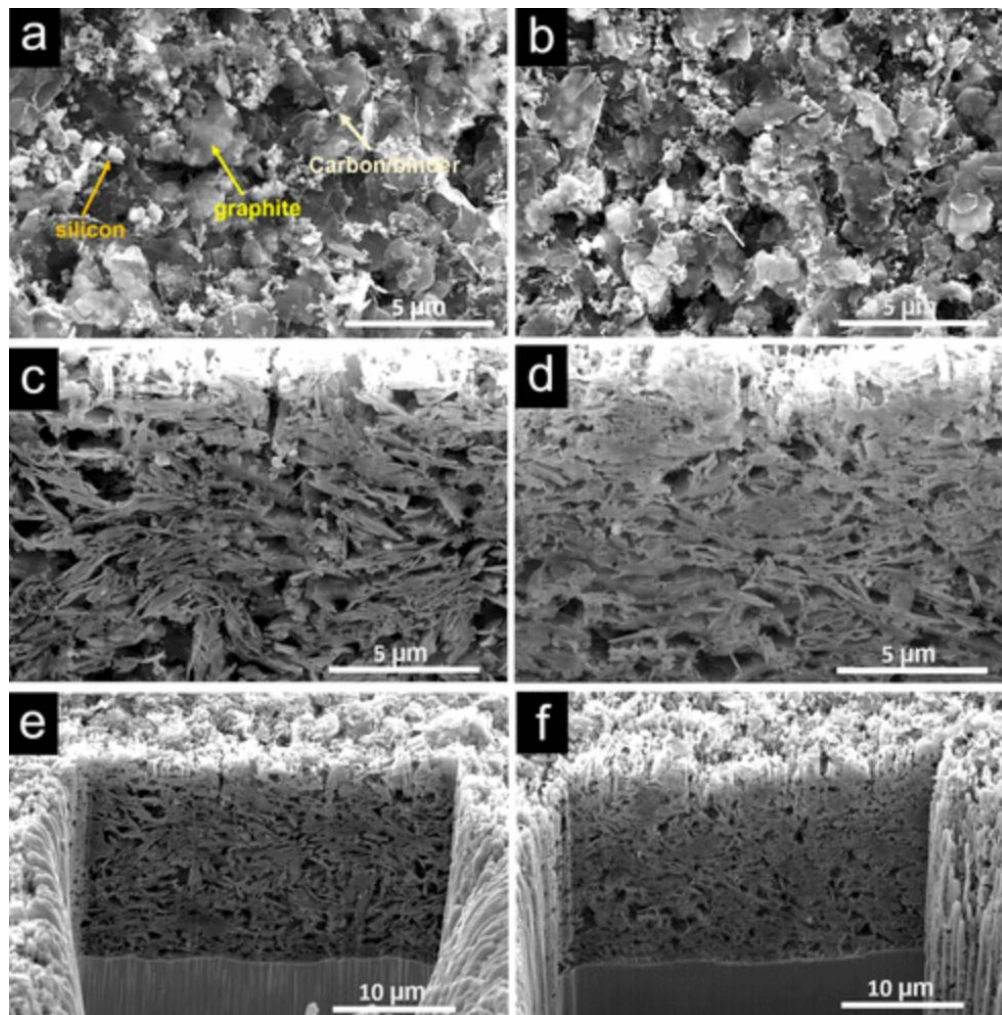
Stabilizácia SEI vrstvy a zlepšenie výkonu Si/Gr anód pomocou ALD ZnO vrstiev



Obrázok 1. Schematické znázornenie SEI vrstvy a jej zložiek pre pôvodné elektródy a pre 20 ALD cyklov ZnO na Si/Gr elektródach.

Kremík (Si) je perspektívny anódový materiál vďaka svojej vysokej teoretickej kapacite. Zároveň sa jedná o druhý najrozšírenejší prvok v zemskej kôre. Napriek tomu tvorba nestabilnej pevnej elektrolytovej medzivrstvy (SEI) a výrazná objemová expanzia počas litiácie spôsobujú štrukturálnu degradáciu, ktorá vedie k úbytku kapacity a obmedzuje cyklickú životnosť anód na báze kremíka.

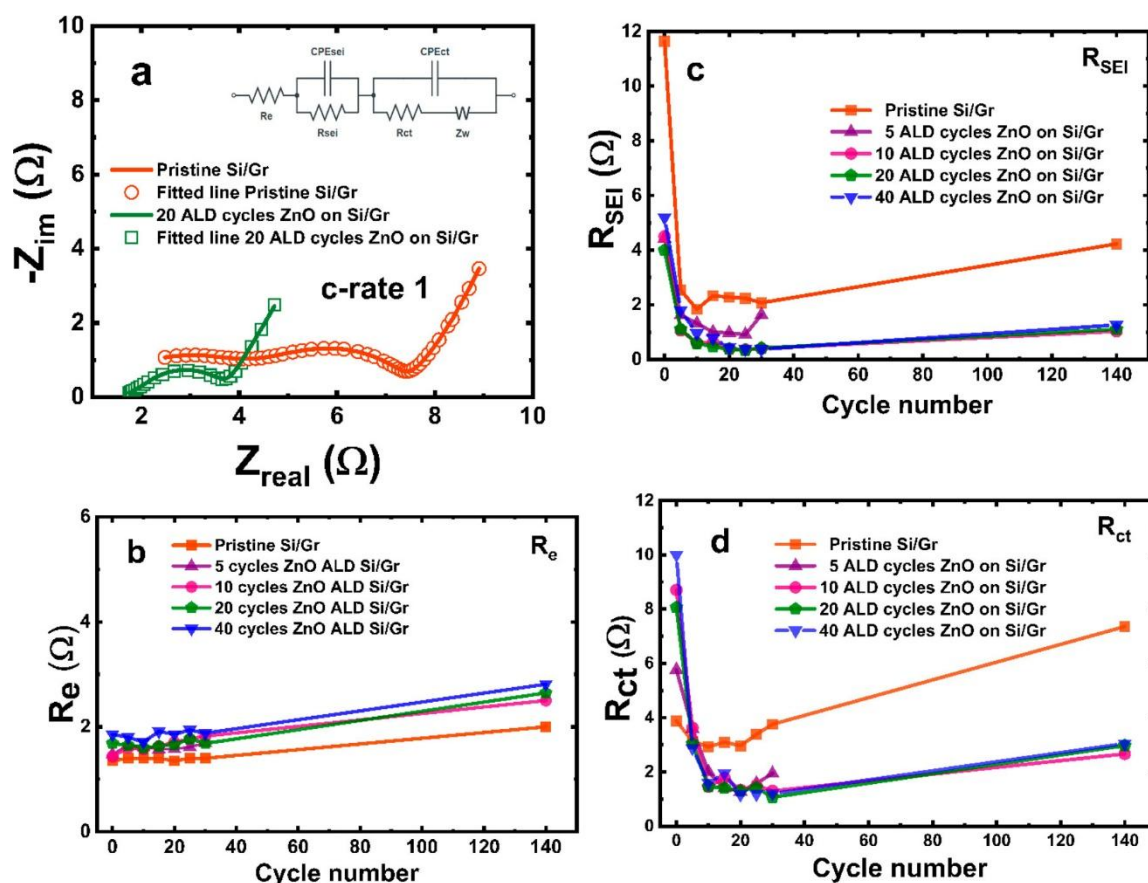
V tejto štúdii bol skúmaný elektrochemický výkon kompozitných elektród kremík/ grafit (Si/Gr) po úprave nanometrovými ZnO filmami nanesenými pomocou depozície po atómových vrstvách (ALD). ZnO vrstvy boli nanesené v rozsahu 5–40 ALD cyklov na približne 20 μm hrubé Si/Gr elektródy.



Obrázok 2. SEM snímky zhora pre (a) pôvodné a (b) 20 ALD cyklov ZnO na Si/Gr elektródach. Priečne rezy (c a e) pôvodných a (d a f) 20 ALD cyklov ZnO na Si/Gr elektródach pred elektrochemickým testovaním.

Elektrochemická charakterizácia zahŕňala galvanostatické cyklovanie pri rôznych C-ratoch a EIS v half-cell konfigurácii, pričom štrukturálne a chemické zmeny boli skúmané pomocou skenovacej elektrónovej mikroskopie (SEM) a röntgenovej fotoelektrónovej spektroskopie (XPS) pred a po elektrochemickom cyklovaní. Elektródy pokryté ZnO jednoznačne preukázali zlepšený výkon pri vyšších prúdových záťažach v porovnaní s pôvodnými Si/Gr elektródami. Reverzibilná konverzia ZnO ALD filmov počas litiácie/delitiácie bola potvrdená pomocou dQ/dV analýzy a XPS, čo ukazuje, že ultratenké ZnO vrstvy pôsobia ako ochranné pokrytie, pasivujú povrch elektródy, napomáhajú tvorbe stabilnejšej SEI vrstvy a uľahčujú transport Li-iónov cez rozhranie. Porovnanie pôvodných a ZnO-modifikovaných vzoriek odhalilo výrazné rozdiely v mechanizmoch (de)litiácie. Elektródy s 20 ALD cyklami ZnO vykázali optimálnu hrúbku vrstvy a najlepší výkon zo všetkých testovaných vzoriek. Pri C-rate

2 zostala väčšia časť elektródy elektrochemicky prístupná v prípade vrstvy so ZnO, čo umožnilo úplnejšiu litiáciu. EIS merania potvrdili významne znížené SEI a odpor prenosu náboja v ZnO-potiahnutých elektródach, pričom tieto nízke hodnoty odporu sa zachovali najmenej 100 cyklov pri C-rate 1. XPS analýza ďalej ukázala, že ZnO modifikácia ovplyvňuje zloženie SEI vrstvy. Zatiaľ čo pôvodné aj pokryté elektródy vytvorili SEI vrstvy obsahujúce typické zlúčeniny ako Li_2CO_3 , LiF, $\text{LiPF}_6/\text{LiXPOyFz}$, alkylkarbonáty a karboxylátové soli, pôvodné vzorky vykazovali po cyklovaní zvýšenú tvorbu karbonátov. Naopak, ZnO-potiahnuté elektródy obmedzili hromadenie karbonátov a udržali tenšiu a stabilnejšiu SEI vrstvu.

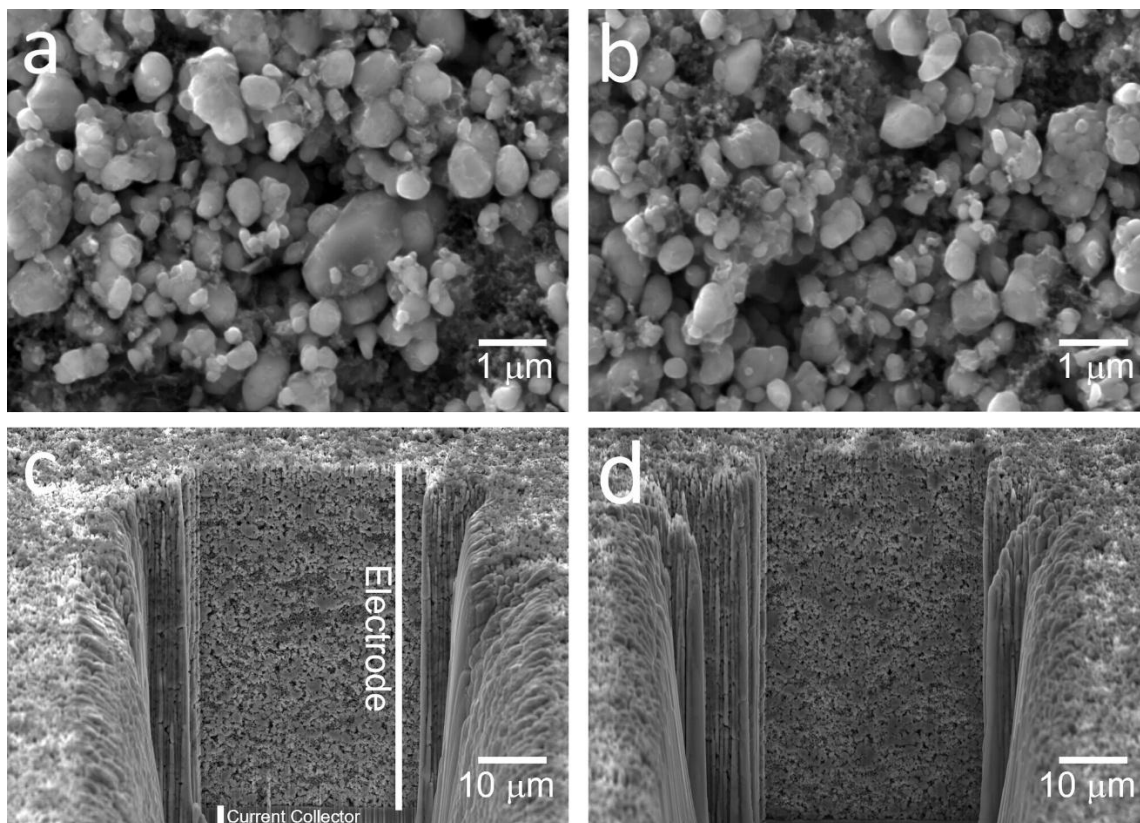


Obrázok 3. Nyquistov graf pôvodných a 20 ALD cyklov ZnO na Si/Gr anódach získaný po vybíjaciach/nabíjaciach cykloch pri 1 C (a). Vložený obrázok: ECM model použitý na fitovanie kriviek. Hodnoty R_e (b), R_{SEI} (c) a R_{ct} (d) získané fitovaním kriviek EIS spektrier.

Tieto výsledky potvrdzujú, že vrstva ZnO nanosená pomocou ALD zohráva ochrannú a stabilizačnú úlohu. Znižuje odpor rozhrania, zlepšuje transport Li-iónov a významne zvyšuje schopnosť elektród pracovať pri vyšších prúdových záťažiach. Keďže ZnO je lacný a široko dostupný materiál, aplikácia nanometrických ZnO vrstiev pomocou ALD môže byť považovaná za efektívny a škálovateľný prístup na zlepšenie výkonu a životnosti anód na báze kremíka.

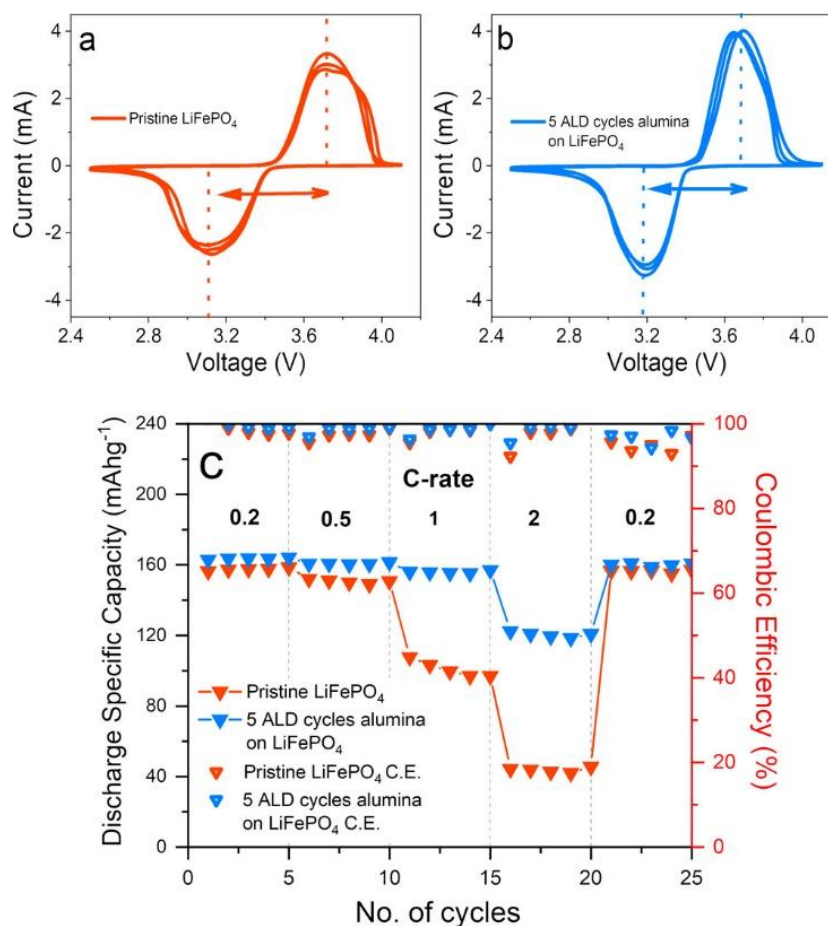
Vylepšený výkon katód LiFePO_4 s Al nanovrstvou nanosenou pomocou ALD: poznatky z elektrochemickej analýzy, operando röntgenovej difrakcie a röntgenovej fotoelektrónovej spektroskopie

Táto štúdia skúmala vplyv ultratenkých vrstiev Al_2O_3 (oxidu hlinitého) nanesených pomocou depozície po atómových vrstvách (ALD) na elektrochemický výkon katód LiFePO_4 (LFP) v lítiovo-iónových batériách. ALD vrstvy v rozsahu 2–20 cyklov boli aplikované na LFP elektródy a ich vplyv na schopnosť práce pri rôznych prúdových záťažiach, cyklickú stabilitu a správanie rozhrania elektróda/elektrolyt bol systematicky skúmaný.



Obrázok 4. SEM snímky zhora pre (a) pôvodné a (b) 5 ALD cyklov alumíny na LiFePO_4 elektródach. Pričné rezy (c) pôvodných a (d) 5 ALD cyklov alumíny na LiFePO_4 elektródach pred elektrochemickým testovaním.

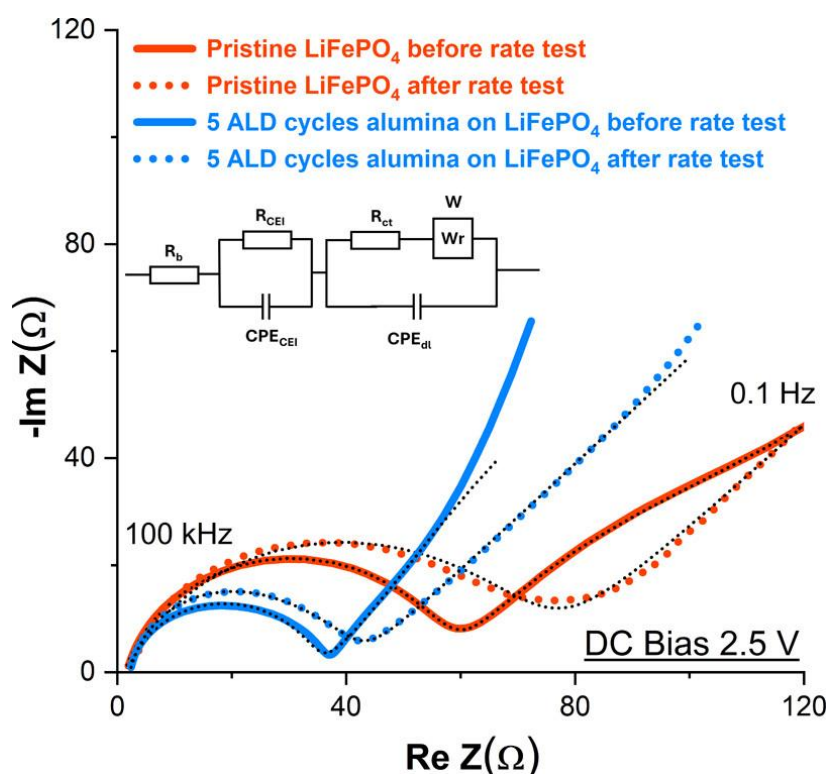
Elektrochemické testy, vrátane cyklickej voltametrie (CV), galvanostatického nabíjania–vybíjania (GCD) a elektrochemickej impedančnej spektroskopie (EIS), boli vykonané na pôvodných aj ALD-pokrytých vzorkách. Katódy s 5–10 ALD cyklami vykázali najlepší výkon, pričom pri vyšších C-ratoch (1–2 C) dosiahli výrazne zlepšené vybíjacie kapacity v porovnaní s nepokrytými elektródami. Tieto výsledky potvrdzujú, že ultratenké vrstvy Al_2O_3 pôsobia ako účinné ochranné bariéry, znižujú priamy kontakt elektrolytu a tým zmierňujú štrukturálnu degradáciu povrchu katódy.



Obrázok 5. Cyklické voltamogramy (a) pôvodného a (b) LiFePO_4 s 5 ALD cyklami Al_2O_3 pri rýchlosti skenu $0,1 \text{ mV}\cdot\text{s}^{-1}$ v rozsahu potenciálu 2,5–4,1 V. Čiarkované čiary a šípky označujú polohy oxidačných/redukčných pík a polarizáciu. (c) Cyklický výkon pôvodného LiFePO_4 a LiFePO_4 s 5 cyklami Al_2O_3 pri rôznych C-ratoch v half-cell konfigurácii.

Analýza impedancie ukázala, že vzorky pokryté Al_2O_3 vykazovali nižší odpor prenosu náboja a znížený odpor CEI rozhrania (parazitické rozhranie na katóde) v porovnaní s pôvodnými elektródami. To naznačuje, že ALD vrstvy Al_2O_3 uľahčujú transport Li-iónov cez rozhranie a prispievajú k stabilnejšej elektrochemickej kinetike. Merania operando röntgenovej difrakcie (XRD) potvrdili, že prechod fázy $\text{LiFePO}_4 \rightarrow \text{FePO}_4$ počas cyklovania bol v pokrytých elektródach reverzibilnejší, čo zdôrazňuje ochrannú úlohu Al_2O_3 filmu. Analýza röntgenovej fotoelektrónovej spektroskopie (XPS) tieto zistenia ďalej podporila. Pôvodné aj pokryté elektródy vykazovali v SEI/CEI vrstve zlúčeniny ako Li_2CO_3 a LiF ; avšak v pokrytých vzorkách bol po cyklovaní pozorovaný zvýšený obsah LiF , čo je v súlade so zlepšenou pasiváciou. Dôležité je, že Al_2O_3 vrstva zostala detekovateľná aj po 100 cykloch pri C-rate 1, čo dokazuje robustnosť a dlhodobú stabilitu ALD nanosených vrstiev.

Ultratenké vrstvy Al_2O_3 nanosené pomocou ALD poskytujú škálovateľný a účinný spôsob, ako zlepšiť výkon katód LiFePO_4 . Stabilizáciou CEI, znížením odporu rozhrania a zachovaním štruktúrnej integrity dosahujú pokryté katódy lepšiu schopnosť práce pri vyšších prúdových záťažach a dlhšiu cyklickú životnosť v porovnaní s pôvodnými LFP elektródami.

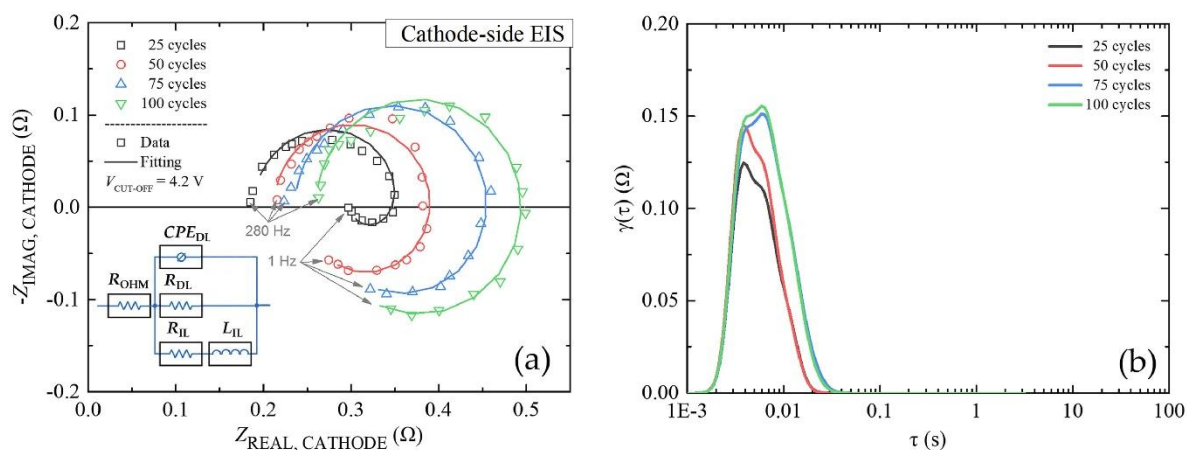


Obrázok 6. Nyquistov graf pôvodnej a 5 ALD cyklami Al_2O_3 pokryté LiFePO_4 katódy získaný pred a po teste prúdovej záťaže. Krátko čiarkované čiary znázorňujú fitovanie experimentálnych dát pomocou ekvivalentného obvodu zobrazeného vo vloženom obrázku.

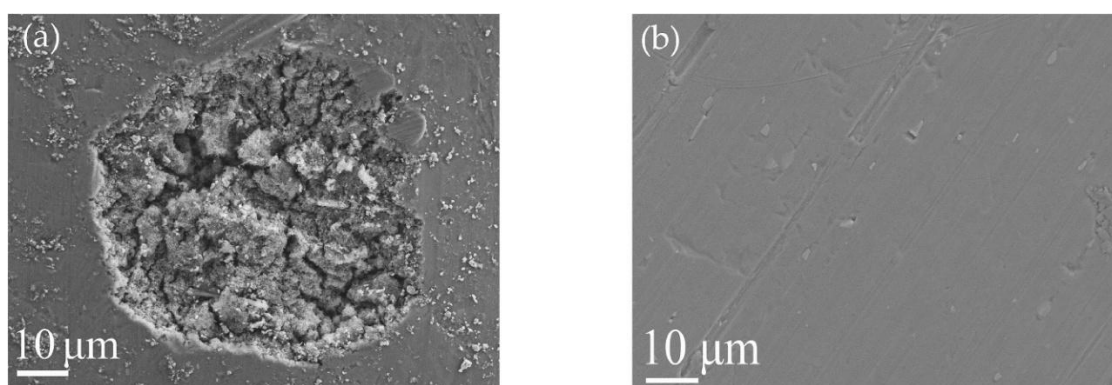
Úloha 4.2 (Pokročilá elektrická a elektrochemická charakterizácia)

In-situ EIS na detekciu korózie v Li-ion batériách s LiFSI elektrolytom

Elektrolyty na báze LiFSI sú považované za atraktívnych kandidátov pre budúcu generáciu vysokonapäťových a vysokoteplotných Li-ion batérií. Ich hlavnou nevýhodou je však tendencia korodovať hliníkové (Al) zberače prúdu. Pochopenie a potlačenie tejto korózie je kľúčové pre bezpečnú a spoľahlivú prevádzku Li-ion článkov s takýmito elektrolytmí. V tejto práci bola použitá in-situ EIS na detekciu korózie hliníkového zberača prúdu v NMC622/grafitových článkoch obsahujúcich 1,0 M LiFSI v EC:DMC (1:1, v/v). Články cyklované do 4,2 V pri 50 °C vykazovali charakteristické indukčné slučky v Nyquistových grafoch na strane katódy, ktoré boli pripísané korózii hliníka. Prítomnosť korózie bola ďalej potvrdená skenovacou elektrónovou mikroskopiou, ktorá ukázala korozívne poškodenie povrchu hliníka. Bol navrhnutý náhradný elektrický model batérie na popis vývoja tohto javu počas cyklovania. Keď bola horná medzná hodnota napätia znížená na 3,7 V, korózia bola úspešne potlačená. Za týchto podmienok Nyquistove grafy nevykazovali žiadne indukčné slučky a SEM zobrazovanie neodhalilo žiadne znaky korózie, čo potvrdzuje, že ochranná natívna vrstva Al_2O_3 zostala zachovaná. Táto priama korelácia medzi EIS odozvou a koróziou Al poukazuje na diagnostický potenciál EIS ako in-situ nástroja na hodnotenie degradačných procesov spôsobených elektrolytom.



Obrázok 7. (a) Nyquistove grafy a (b) DRT katódy článku cyklovaného do 4,2 V.

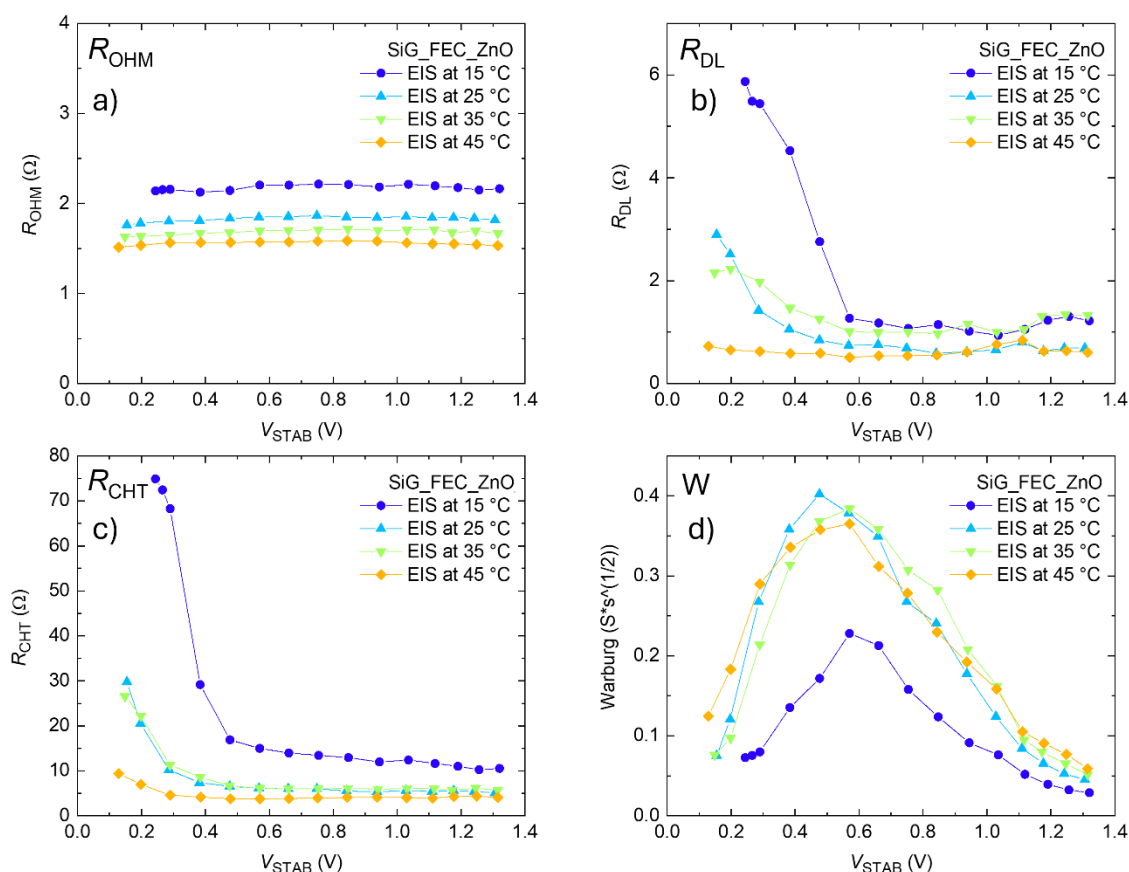


Obrázok 8. SEM snímky hliníkový zberačov prúdu vybratých z článkov testovaných počas 100 cyklov s hornou medznou hodnotou napätia (a) 4,2 V a (b) 3,7 V.

Štúdiá ukazujú, že elektrolyty na báze LiFSI môžu spôsobovať koróziu hliníkový zberačov prúdu pri zvýšených teplotách a napätiach, avšak takéto účinky možno zmierniť obmedzením napätia. Tieto výsledky prispievajú k návrhu vysokonapäťových elektrolytov na báze LiFSI tým, že poskytujú metodiku na detekciu korózie v reálnom čase a ponúkajú poznatky o stratégiách jej potlačenia.

Elektrochemická charakterizácia tepelných vlastností ZnO pokrytých SiG anód – predbežné výsledky

EIS merania boli vykonané na experimentálnych Si/Gr half-cell článkoch s ochrannou vrstvou ZnO nanosenou pomocou ALD, zostavených v konfigurácii PAT-Cell. Ako anóda bolo použité metalické lítium. Merania sa realizovali pri rôznych teplotách (15 °C, 25 °C, 35 °C a 45 °C). Články boli nabíjané postupne od úplne vybitého stavu do 1,4 V v krokoch po 0,1 V. Po každom nabíjacom kroku boli články ponechané relaxovať 5 hodín pred vykonaním EIS meraní. Impedančné spektrá boli fitované náhradným elektrickým modelom a bol vyhodnocovaný vývoj R_{OIM} , R_{DL} , R_{CHT} a Warburgovho prvkú v závislosti od stavu nabitia (SOC) a teploty.



Obrázok 9. Výsledky fitovania EIS dát pomocou náhradného elektrického modelu, merané pri rôznych teplotách a stavoch nabitia experimentálnej ZnO-pokrytej SiG half-cell batérie.

- **R_{OHM}** Ohmický odpor zostal takmer nemenný vo všetkých podmienkach SOC a teploty, čo naznačuje stabilný elektrolyt a kontaktné odpory.
- **R_{DL}** Odpor dvojitej vrstvy vykazoval rastúce hodnoty so znižujúcou sa teplotou, pričom tento efekt bol najvýraznejší pri nižších napätiach.
- **R_{CHT}** Odpor prenosu náboja bol relatívne stabilný v rozsahu 0,6 V až 1,4 V. Avšak pod 0,6 V R_{CHT} výrazne stúpal, keď sa potenciál blížil k 0 V, pričom tento efekt bol výraznejší pri nižších teplotách.
- **W** Difúzne súvisiaca impedancia vykazovala profil v tvare vrcholu s maximom okolo 0,5 V a klesajúcimi hodnotami smerom k vyšším aj nižším napäťovým extrémom. Pri 25, 35 a 45 °C mala Warburgova konštanta porovnateľné hodnoty, zatiaľ čo pri 12 °C výrazne klesla, čo naznačuje obmedzenú difúziu Li-iónov pri zníženej teplote.

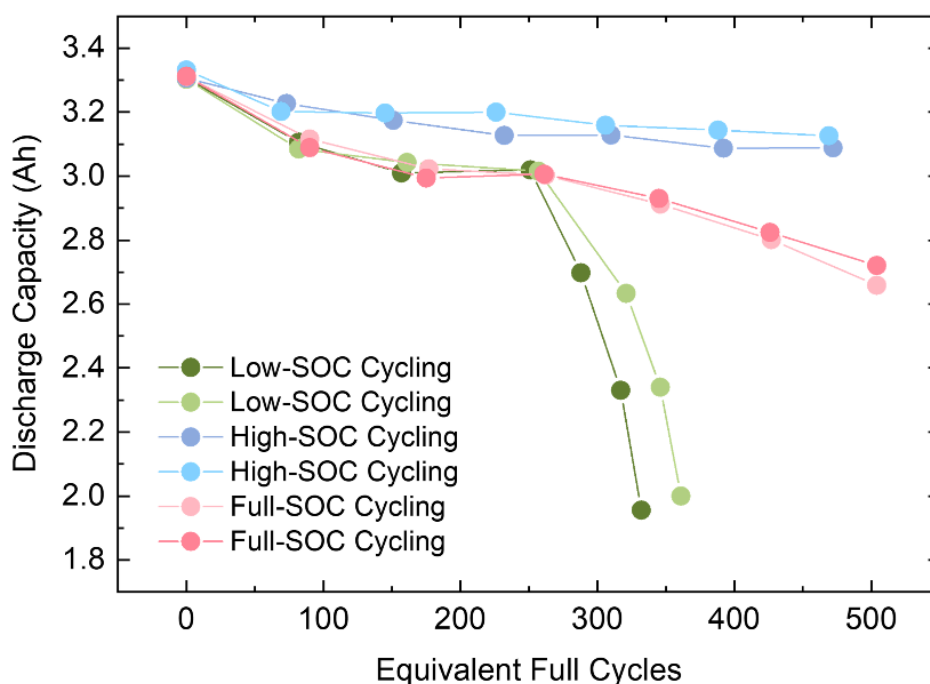
Tieto predbežné výsledky potvrdzujú silnú závislosť rozhraní a transportných procesov od napätia aj teploty v Si/Gr elektródach so ZnO úpravou. Pozorovaný nárast R_{DL} a R_{CHT} pri nízkych teplotách a nízkych napätiach spolu s potlačenými difúznymi procesmi pri 12 °C zdôrazňujú dôležitosť rozšírenia štúdie na 0 °C a nižšie teploty, aby sa plne zachytili výkonové obmedzenia v realistických prevádzkových podmienkach.

Vplyv pracovného okna na degradáciu a správanie OCV SiOx/grafitových anód – predbežné výsledky

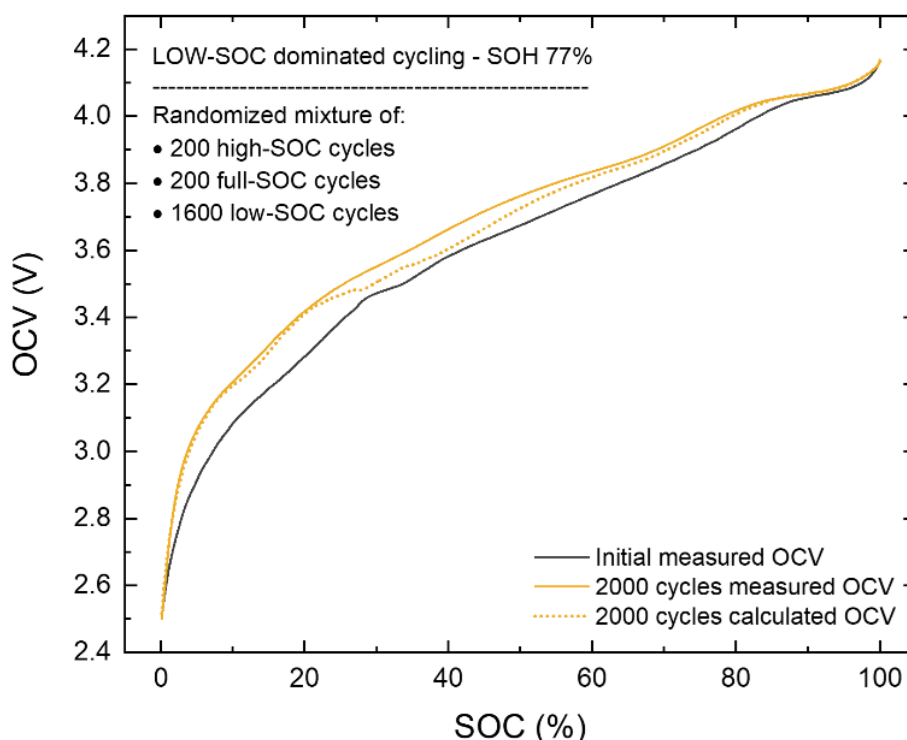
V tejto časti štúdie boli skúmané komerčne dostupné články Molicel M35A 18650 (nominálna kapacita 3,5 Ah). Elektrody týchto článkov pozostávajú z kompozitných materiálov: anóda je zložená z približne 87 wt% grafitu, približne 10 wt% oxidu kremičitého (SiOx) a približne 3 wt% neaktívnych zložiek, zatiaľ čo katóda je zložená z približne 93 wt% niklovo-kobaltovo-hlinitého oxidu (NCA) a približne 7 wt% neaktívnych zložiek. Prítomnosť SiOx v anódovom kompozite robí tieto články obzvlášť vhodnými na analýzu toho, ako degradácia kremíka ovplyvňuje správanie napätia naprázdno (OCV) počas cyklovania. Primárnym cieľom bolo vyhodnotiť, ako cyklovanie v rôznych oknách stavu nabitia (SOC) ovplyvňuje degradáciu a následný vývoj OCV krivky. Keďže frakcia kremíka v kompozitných anódach má tendenciu degradovať najvýraznejšie pri nízkom SOC, boli implementované tri scenáre cyklovania:

- Cyklovanie v rámci nízkeho SOC okna
- Cyklovanie v rámci vysokého SOC okna
- Cyklovanie v rámci celého SOC okna

Pokles kapacity, prepočítaná na ekvivalentné plné cykly, jasne ukázala, že cyklovanie v nízkom SOC okne viedlo k najrýchlejšej degradácii. Po približne 300 cykloch články v tomto scenári úplne zlyhali. Naopak, cyklovanie v celom SOC okne vykazovalo postupný pokles kapacity bez zlyhania, zatiaľ čo cyklovanie vo vysokom SOC okne ukázalo len minimálny pokles kapacity, čo naznačuje, že degradačné procesy sú v tomto scenári výrazne potlačené.



Obrázok 10. Vývoj vybijacích kapacít komerčných Li-ion batérií so SiG anódami cyklovaných v rôznych rozsahoch SOC okna.



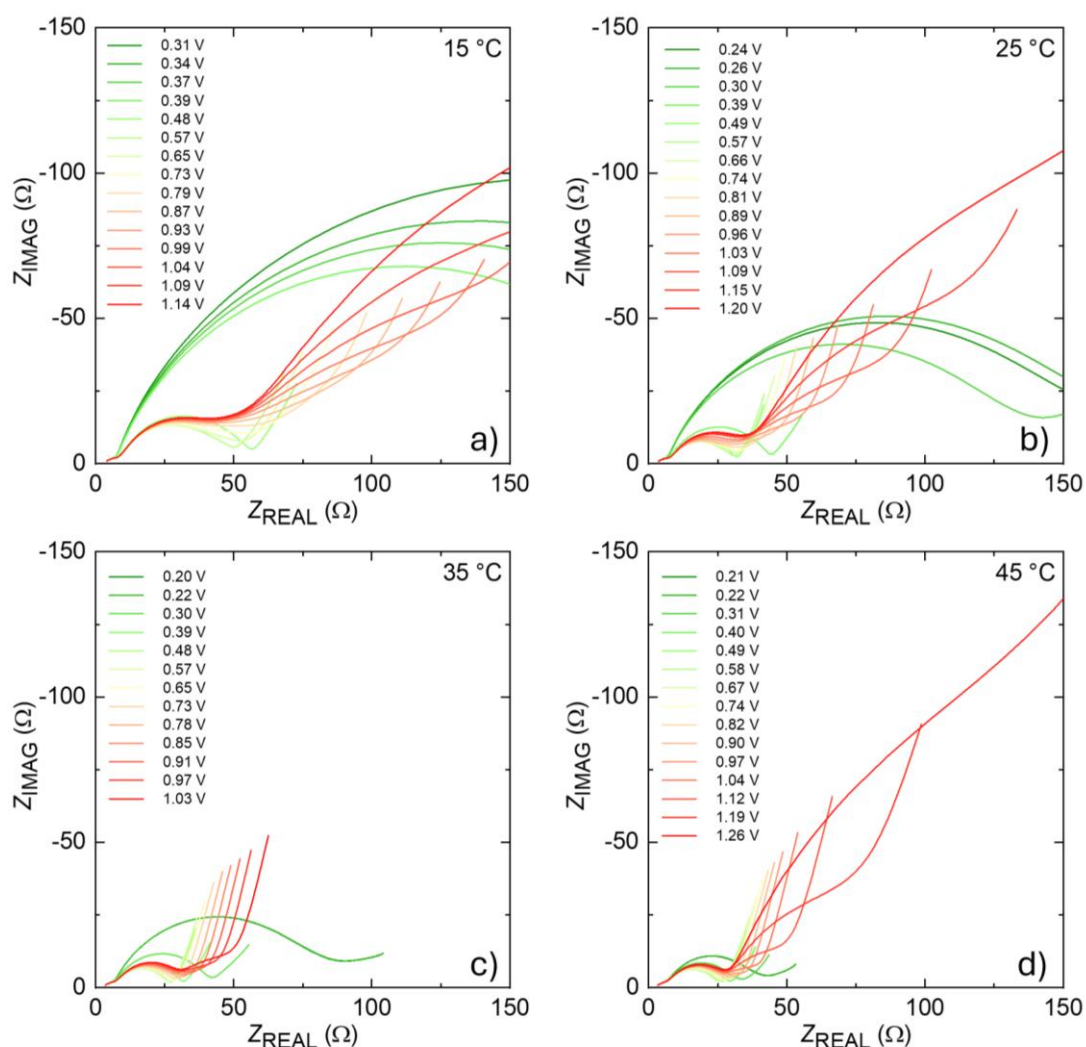
Obrázok 11. Vybrané porovnanie meranej a vypočítanej OCV krivky s OCV krivkou získanou počas inicializácie novej batérie.

Na ďalšie preskúmanie vplyvu histórie cyklovania boli OCV krivky merané po definovaných intervaloch cyklov: každých 100 cyklov pri cyklovaní v celom SOC okne a každých 400 cyklov pri cyklovaní v nízkom a vysokom SOC okne (na zabezpečenie porovnateľného počtu EFC medzi scenármi). OCV krivky odhalili výrazné posuny v závislosti od cyklačného okna, čo potvrdzuje, že degradácia frakcie kremíka mení správanie kompozitnej elektródy a tým aj celkový napäťový profil. V druhej časti experimentu boli články cyklované v kombinovaných SOC oknách. OCV krivka bola rekonštruovaná pomocou degradačných dát z jednotlivých scenárov cyklovania, skombinovaných podľa histórie cyklovania (pomeroch SOC okien). Bolo testovaných niekoľko scenárov vrátane pomeroch 1:1:1, 8:1:1, 1:8:1 a 1:1:8, ako aj úplne náhodných cyklačných scenárov. Rekonštruované OCV krivky vykazovali vizuálnu zhodu s experimentálne nameranými OCV krivkami článkov degradovaných za zodpovedajúcich kombinovaných podmienok. To dokazuje, že OCV krivku degradovaných článkov s kompozitnými anódami možno aproximovať vážením príspevkov degradácií z rôznych SOC okien.

Tieto zistenia sú kľúčové pre systémy riadenia batérií (BMS), keďže vzťah OCV–SOC sa s degradáciou kompozitných anód obsahujúcich kremík mení. Ak sa OCV krivka počas životnosti batérie neaktualizuje, odhad SOC sa môže stať nepresným. Predstavená metodika ponúka cestu k dynamickému generovaniu a aktualizácii OCV kriviek na základe skutočnej histórie cyklovania článku, čím umožňuje presnejšie určenie SOC v BMS a podporuje bezpečnejšiu a spoľahlivejšiu prevádzku lítiovo-iónových batérií s kompozitnými Si/Gr anódami.

Vplyv okolitej teploty na elektrochemické vlastnosti kremíkom bohatej kompozitnej elektródy Gr/Si pre pokročilé Li-ion batérie – predbežné výsledky

Tento prebiehajúci experiment sa zameriava na half-cell batérie využívajúce kovové lítium ako referenčnú elektródu a kompozitnú elektródu ako pracovnú elektródu. V tomto kompozite je konvenčný grafit čiastočne nahradený materiálom s vysokým obsahom kremíka, ktorý tvorí približne 50 % celkovej hmotnosti elektródy. Formulácia elektrolytu obsahuje fluóroetylénkarbonát (FEC) ako aditívum na zlepšenie stability SEI vrstvy. Merania EIS boli vykonané v celom rozsahu potenciálu half-cell článku (0–1,5 V vs. Li/Li⁺). Protokol pozostával z úplného vybitia, po ktorom nasledovala 1-hodinová relaxácia na dosiahnutie rovnovážneho stavu článku, po ktorej sa zaznamenalo EIS spektrum. Následne bol článok nabíjaný v krokoch po 0,1 V, pričom po každom kroku nasledovala 1-hodinová relaxácia a následné EIS meranie. Tento postup sa opakoval až do dosiahnutia 1,5 V, kde prebehla finálna relaxácia a meranie EIS. OCV namerané po každom relaxačnom kroku bolo použité ako referencia pre všetky grafické znázornenia.



Obrázok 12. Nyquistove grafy skúmanej half-cell batérie získané pri rôznych úrovniach OCV a rôznych teplotách, kde a) predstavuje merania pri 15 °C, b) pri 25 °C, c) pri 35 °C a d) pri 45 °C.

Experiment bol zopakovaný pri štyroch rôznych teplotách: 15 °C, 25 °C, 35 °C a 45 °C. Výsledné Nyquistove grafy sú zobrazené na obrázku 12, kde a) – d) zodpovedajú meraniam pri 15 °C, 25 °C, 35 °C a 45 °C. Pri najnižších hodnotách OCV vykazujú impedančné spektrá veľmi veľké reálne aj imaginárne zložky impedancie, čím vytvárajú výrazný vysokofrekvenčný polkruh, ktorý indikuje silnú polarizáciu rozhrania elektróda–elektrolyt. S rastúcim potenciálom článku tento polarizačný efekt slabne, po čom nasleduje postupné zväčšovanie priemeru dominantného polkruhu so stúpajúcim SOC (reprezentovaným hodnotami OCV). Vo všetkých teplotných režimoch je pozorovaný výskyt druhého polkruhu pri nižších frekvenciách, ktorý sa stáva výrazne viditeľným pre OCV hodnoty nad približne 1 V. Ako sa dalo očakávať, EIS spektrá merané pri nižších teplotách všeobecne vykazujú vyššie hodnoty impedancie. Okrem toho bol pozorovaný teplotne závislý posun nástupu druhého polkruhu, čo naznačuje, kinetika rozhrania a difúzne procesy sú teplotou ovplyvnené odlišným spôsobom. Budúca práca bude zahŕňať analýzu týchto meraní pomocou metódy distribúcie relaxačných časov (DRT) simulovania náhradným elektrickým modelom. Tieto výsledky budú porovnané s meraniami vykonanými na elektródach s rôznymi pomermi grafitu a kremíka, aby sa objasnil vplyv obsahu kremíka na impedančné správanie.

Zhrnutie výsledkov prezentovaných v Reporte M1-M12 (D4.1)

Práce prezentované v tomto reporte sa zameriavajú na systematickú štrukturálnu, morfológickú a elektrochemickú charakterizáciu vybraných elektród a batérií s cieľom lepšie porozumieť vzťahu medzi materiálovými vlastnosťami a výkonom článkov. V rámci úloh 4.1 a 4.2 boli realizované experimenty kombinujúce mikroskopické a spektroskopické techniky s elektrochemickými metódami.

- Si/Gr anódy s ALD ZnO vrstvami preukázali ochrannú a stabilizačnú funkciu ultratenkých ZnO vrstiev. ZnO znížilo odpor SEI vrstvy a zlepšilo transport Li-iónov. Najlepší výkon vykazovali elektródy s 20 ALD cyklami, pričom nízky odpor prenosu náboja bol zachovaný minimálne 100 cyklov.
- Katódy LiFePO₄ s ALD Al₂O₃ vrstvami vykazovali zlepšený výkon pri vysokých C-ratoch, nižší odpor CEI rozhrania a stabilnejšiu cyklickú životnosť. Operando XRD a XPS potvrdili reverzibilnejší fázový prechod a lepšiu pasiváciu skúmaného povrchu.
- In-situ EIS merania umožnili detegovať koróziu hliníkového zberača prúdu v experimentálnych half-cell článkoch s LiFSI elektrolytom. Pri 50 °C a 4,2 V sa objavili charakteristické indukčné slučky, ktoré po znížení napäťového limitu na 3,7 V neboli prítomné v Nyquistových grafoch, čo potvrdzuje diagnostický potenciál EIS pre monitorovanie korozívnej degradácie zberačov prúdov.
- Predbežné EIS výsledky na ZnO/SiGr half-cell anódach ukázali stabilný ohmický odpor, nárast odporu dvojitej vrstvy a prenosu náboja pri nízkych teplotách a nízkych SOC a potlačenú difúziu lítiových iónov pri 15 °C.
- Pri komerčných článkoch Molicel M35A bolo analyzovaný vplyv rôznych SOC okien na degradáciu SiOx/grafitových anód a vývoj OCV kriviek. Bola vyvinutá metodika na rekonštrukciu OCV kriviek na základe histórie cyklovania, čo je dôležité pre presnejší odhad SOC v systémoch BMS.