

YUQORI SAMARADORLIKKA EGA RUX-IONLI AKKUMULYATORLARINING ANOD MATERIALLARINI BARQARORLASHTIRISH: NAZARIY TAHLIL VA KONCEPTUAL YECHIM

Sa’dullayeva Muxlisa Otoboy qizi

Mirzo Ulug‘bek nomidagi O‘zMU magistranti

Email: smuxlisa20@gmail.com

Tulaganov Sardor Anvarovich

U.A.Arifov nomidagi Ion-plazma va lazer texnologiyalari instituti k.i.x.

Email: tulaganov@iplt.uz

<https://orcid.org/0000-0003-1881-2165>

<https://doi.org/10.5281/zenodo.18981812>

Abstract: Zinc-ion batteries (ZIB) are considered promising energy storage systems due to their low cost, intrinsic safety, and operation based on aqueous electrolytes. However, dendrite formation and corrosion processes at the metallic zinc anode limit cycling stability. In this work, the physicochemical mechanisms of dendrite growth are analysed, and a conceptual approach is proposed to homogenize ion flux using a graphene-based artificial interfacial layer. The proposed methodology requires further experimental validation.

Keywords: zinc-ion batteries, dendrite, graphene, ion flux, zinc anode, electrolyte.

Аннотация: Цинк-ионные аккумуляторы (ZIB) рассматриваются как перспективные системы накопления энергии благодаря их низкой стоимости, безопасности и использованию водного электролита. Однако образование дендритов и коррозионные процессы на металлическом цинковом аноде существенно ограничивают циклическую стабильность устройств. В данной работе анализируются физико-химические механизмы роста дендритов, а также предлагается концептуальный подход, направленный на выравнивание ионного потока посредством искусственного интерфейсного слоя на основе графена. Предложенная методология требует дальнейшей экспериментальной верификации.

Ключевые слова: цинк-ионные аккумуляторы, дендрит, графен, ионный поток, цинковый анод, электролит.

Annotatsiya: Rux-ionli akkumulyatorlar (ZIB) arzonligi, xavfsizligi va suvli elektrolit asosida ishlashi sababli istiqbolli energiya saqlash tizimlari hisoblanadi. Biroq metall rux anodida dendrit hosil bo‘lishi va korroziya jarayonlari sikl barqarorligini cheklaydi. Mazkur ishda dendrit o‘shining fizik-kimyoviy mexanizmlari tahlil qilinadi hamda grafen asosidagi sun’iy interfeys qatlami yordamida ion oqimini tekislashga qaratilgan konseptual yondashuv taklif etiladi. Taklif etilgan metodologiya kelgusida eksperimental tekshiruvni talab qiladi.

Kalit so‘zlar: rux-ionli akkumulyatorlar, dendrit, grafen, ion oqimini, rux anodi, elektrolit.

Rux-ionli akkumulyatorlar (ZIB) qayta tiklanuvchi energiya manbalari bilan integratsiyalashgan energiya saqlash tizimlari uchun istiqbolli elektrokimyoviy platforma hisoblanadi. Quyosh va shamol energetikasining kengayishi energiya ishlab chiqarish va iste’mol o‘rtasidagi vaqt nomuvofiqligini kuchaytirmoqda, bu esa xavfsiz, iqtisodiy va uzoq muddatli ishlashga ega akkumulyator tizimlarini ishlab chiqishni dolzarb vazifaga aylantiradi [1]. Tarmoq miqyosidagi energiya saqlash qurilmalari yuqori xavfsizlik, past xarajat va ekologik barqarorlik talablariga javob berishi lozim. Shu jihatdan ruxning yer yuzasida keng tarqalganligi, arzonligi va suvli elektrolit asosida ishlash imkoniyati ZIB tizimlarini litiy-ionli akkumulyatorlarga nisbatan xavfsizroq va barqarorroq alternativ sifatida ko‘rsatadi [2]. Bundan tashqari, suvli muhit yonuvchan organik erituvchilarga ehtiyojni bartaraf etadi va qizish xavfini kamaytiradi.

Shu bilan birga, ZIB tizimlarining asosiy cheklovchi omili metall rux anodida zaryad–razryad jarayonida yuzaga keladigan dendrit o‘shidir. $Zn \leftrightarrow Zn^{2+}$ qaytar-oksidlanish reaksiyasi davomida ionlarning notekis cho‘kishi anod yuzasida ignasimon kristall tuzilmalar shakllanishiga olib keladi [3]. Elektrokimyoviy cho‘kish jarayonida tok zichligining lokal ortishi va massa almashinuvi cheklanishi ionlarning yuzada bir tekis taqsimlanmasligiga sabab bo‘ladi. Dendrit hosil bo‘lishi lokal tok zichligining ortishi, ion diffuziyasining cheklanishi va kristall yadrolanish kinetikasining

“Ilmiy tadqiqotlarni amaliyotga joriy qilishning muammo va yechimlari” mavzusidagi onlayn xalqaro ilmiy-amaliy anjuman materiallar to‘plami. NamDU - 2026-yil 20-21-fevral

boshqarilmasligi bilan bog‘liq murakkab fizik-kimyoviy jarayondir [4,5]. Nukleatsiya bosqichida yuzaning sirt energiyasi, kristall yo‘nalishi va elektrokimyoviy ortiqcha potensial muhim rol o‘ynaydi. Ionlar anod yuzasida notekis taqsimlanganda, yuqori energiyali nuqtalarda tezroq nukleatsiya sodir bo‘ladi va vertikal yo‘nalishda o‘sovchi kristallar shakllanadi. Bu jarayon vaqt o‘tishi bilan o‘z-o‘zini kuchaytiruvchi mexanizmga aylanadi, chunki o‘sib borayotgan dendrit uchlari yanada yuqori tok zichligini jamlaydi. Natijada separator shikastlanishi, ichki qisqa tutashuv va sikl barqarorligining pasayishi kuzatilishi mumkin. Bundan tashqari, rux anodida korroziya va yon reaksiyalar (masalan, vodород ajralishi) ham samaradorlikka salbiy ta‘sir ko‘rsatadi.

Dendrit o‘shishini kamaytirish uchun anod–elektrolit interfeysini energetik va kinetik jihatdan barqarorlashtirish muhim hisoblanadi. Interfeys muhandisligi sirt energiyasini boshqarish, ion migratsiyasini tekislash va nukleatsiya jarayonini nazorat qilish orqali dendritlarning shakllanishini kamaytirishga qaratilgan zamonaviy strategiyalardan biridir. Shu nuqtai nazardan, mazkur ishda Zn folga yuzasida grafen asosidagi yupqa 2D qatlam hosil qilishga asoslangan konseptual yondashuv taklif etiladi. Grafenning yuqori elektr o‘tkazuvchanligi, mexanik mustahkamligi va kimyoviy inertligi ion oqimini tekislash hamda lokal tok zichligini kamaytirishga xizmat qilishi mumkin [6]. Bundan tashqari, grafenning ikki o‘lchamli kristall tuzilishi ionlar uchun bir xil energiyali nukleatsiya markazlarini hosil qilib, cho‘kish jarayonini barqarorlashtiradi. Nazariy jihatdan bunday sun‘iy interfeys sirt energiyasini optimallashtirib, kristallanish jarayonini nazorat ostiga olish orqali dendritlarning vertikal o‘shishini cheklaydi hamda cho‘kish–erish jarayonini reversibil qiladi.

Taklif etilgan yondashuvni eksperimental jihatdan baholash uchun CR2032 tipidagi coin-cell hujayrada 2 M ZnSO₄ elektrolit, 25 °C harorat va 1 mA/cm² tok zichligida galvanostatik zaryad–razryad sinovlari o‘tkazish rejalashtirilmoqda. Uzoq muddatli sikllash sinovlari orqali Kulon samaradorligi va sig‘imning saqlanish darajasi aniqlanadi. Interfeys qarshiligini aniqlash uchun elektrokimyoviy impedans spektroskopiyasi (EIS), sirt morfologiyasini tahlil qilish uchun skanerlovchi elektron mikroskopiya (SEM) usullaridan foydalanish ko‘zda tutilgan. Qo‘shimcha ravishda, sirtning kristall tuzilishini aniqlash uchun rentgen difraksiyasi (XRD) hamda sirt kimyoviy tarkibini baholash uchun XPS tahlili qo‘llanishi mumkin. Ushbu metodologiya ion taqsimoti, polarizatsiya, interfeys qarshiligi va morfologik barqarorlik o‘rtasidagi bog‘liqlikni aniqlash imkonini beradi.

Xulosa qilib aytganda, rux anodida dendrit hosil bo‘lish mexanizmi fizik-kimyoviy nuqtai nazardan chuqur tahlil qilindi va grafen asosidagi sun‘iy interfeys qatlami orqali ion oqimini boshqarishga qaratilgan konseptual model taklif etildi. Mazkur yondashuv nazariy asoslangan bo‘lib, uning samaradorligini aniqlash uchun tizimli eksperimental tadqiqotlar talab etiladi. Agar grafen asosidagi interfeys ion oqimini bir tekis taqsimlashga erishsa, bu ZIB tizimlarining sikl barqarorligi va xavfsizligini sezilarli darajada oshirishi mumkin. Ushbu ish kelgusidagi amaliy izlanishlar uchun metodologik asos bo‘lib xizmat qiladi hamda yuqori samaradorlikka ega suvli energiya saqlash tizimlarini ishlab chiqishda ilmiy platforma vazifasini bajaradi.

Foydalanilgan adabiyotlar

1. Zhang N., Cheng F., Liu Y., et al. Recent advances in rechargeable zinc-ion batteries. *Chemical Society Reviews*, 2020, 49(13), 4203–4219. DOI: 10.1039/C9CS00349F
2. Li C., Xie X., Liang S., Zhou J. Issues and future perspective on zinc metal anode for rechargeable aqueous batteries. *Energy & Environmental Science*, 2020, 13(3), 745–770. DOI: 10.1039/C9EE02539A
3. Yang Q., Wang Y., Zhang X., et al. Dendrite-free zinc metal anodes for rechargeable aqueous batteries. *Nature Communications*, 2021, 12, 1232. DOI: 10.1038/s41467-021-21415-3
4. Sun W., Wang F., Hou S., et al. Zn metal anodes for aqueous zinc-ion batteries. *Advanced Energy Materials*, 2021, 11(12), 2003568. DOI: 10.1002/aenm.202003568
5. Liang S., Cao L., et al. Mechanistic insights into Zn plating/stripping processes. *Energy Storage Materials*, 2022, 45, 421–430. DOI: 10.1016/j.ensm.2021.12.015
6. Zhao Z., Zhang Y., et al. Mechanism of dendrite formation in aqueous Zn batteries. *Journal of Power Sources*, 2023, 560, 232657. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2023.232657