

이종 계면저항 저감 구조를 적용한 그래핀 양자점 기반의 고체 전해질 특성

황성원*†

*† 상명대학교 시스템반도체공학과

Characteristics of Composite Electrolyte with Graphene Quantum Dot for All-Solid-State Lithium Batteries

Sung Won Hwang*†

*† Department of System Semiconductor Engineering, Sangmyung University

ABSTRACT

The stabilized all-solid-state battery structure indicate a fundamental alternative to the development of next-generation energy storage devices. Existing liquid electrolyte structures severely limit battery stability, creating safety concerns due to the growth of Li dendrites during rapid charge/discharge cycles. In this study, a low-dimensional graphene quantum dot layer structure was applied to demonstrate stable operating characteristics based on Li⁺ ion conductivity and excellent electrochemical performance. Transmission electron microscopy analysis was performed to elucidate the microstructure at the interface. The low-dimensional structure of GQD-based solid electrolytes has provided an important strategy for stable scalable solid-state lithium battery applications at room temperature. This study indicates that the low-dimensional carbon structure of Li-GQDs can be an effective approach for the stabilization of solid-state Li matrix architectures.

Key Words : Solid-State, Lithium Batteries, Composite Electrolyte, Quantum dot, Graphene

1. 서 론

최근 전기차를 중심으로 고안정성 이차전지에 대한 수요가 증가하고 있으며, 고밀도 시스템에 대한 요구를 충족시키기 위해 전고체 리튬 전지가 주목을 받고 있다. 이는 배터리 폭발 위험이 없고 높은 에너지 밀도가 가능하기 때문에 전고체 전해질을 갖는 고안정성 배터리는 차세대 배터리 기술로서 다양한 응용이 가능하다. 전지의 용량은 이동하는 Li⁺ 이온의 양에 의해 결정되며, 전해질 내 Li⁺ 이온 전도도는 전지의 충방전 속도에 영향을 주는 것으로 알려져 있다 [1-3]. 고출력을 위해 이동하는 Li⁺ 이온과 전자의 양을 늘려야 하는데, 기존 액체전해질 기반

의 리튬 이온 배터리는 에너지 저장 용량과 안정성에 한계가 있다. 애노드로서 리튬 금속은 비용량이 높고 전기화학적 포텐셜이 낮음에도 불구하고, 이종 계면에서의 불균질 반응 특성으로 인해 Li 덴드라이트로 알려진 고체 전해질 계면의 비자발적 형성 및 전기적 단락 반응을 초래한다 [4-6]. 이 문제는 Li 덴드라이트에 의한 부작용으로 인한 안전상의 위험뿐만 아니라 낮은 쿨롱 효율과 수명 단축의 한계를 나타낸다 [7-10].

본 연구에서는 Graphene Quantum dot (GQD) 기반 Li⁺ 이온 제어 구조를 사용하여 Li 양극 금속층에 대한 패시베이션 구조를 형성하였다. 이종계면에 존재하는 결함과 고체 전해질 사이의 기공으로 인해 입자 간의 접촉이 원활하지 않기 때문에 리튬 이온이 이동하는 유효 접촉 면적이 작아 지는 이슈를 해결하기 위해 저차원 결합저감 구

†E-mail: sungwon@smu.ac.kr

조를 사용하여 리튬 이온이 원활하게 이동할 수 있도록 전극과 고체 전해질 사이의 유효 접촉 면적을 최대화하였다. 셀 제작 시 전극 내부의 결함과 기공을 차단하기 위해 GQD 층으로 코팅된 고체 전해질을 사용함으로써 리튬 이온 이동 시 계면 저항이 효과적으로 개선되는 구조를 설계하였다. Li 덴드라이트 성장은 수정된 Li 금속 계면의 Li⁺ 플럭스와 균질한 GQD 층의 우수한 기계적 강도로 인해 효과적으로 억제되어 Li 수송돌기 전파에 대한 물리적 장벽으로 작용할 수 있는 고체 전해질의 개발을 제안하였다.

2. 본 론

2.1 실험 방법

Fig. 1은 Anode/Li metal 층 위에 5 nm 홀 크기 및 10 nm 두께를 갖는 SiN template 층을 제작하고, Pulsed Laser Deposition 방법을 통해 Cu 10 nm 두께 증착 후, Inductively Coupled Plasma-Chemical Vapor Deposition (ICP-CVD) 에서 아세틸렌 가스를 주입하며 그래핀 양자점 직성장 층을 제작한 모식도이다. LATP (phosphate계의 NASICON 구조를 가진 Li_{1-x}Al_xTi_{2-x}(PO₄)₃) 고체 전해질 층은 Li₂CO₃ 5~10% + TiO₂ 15~30% + Al₂O₃ 5~10% + (NH₄)₂HPO₄ 30~50%의 혼합분말을 ball milling 한 후 650°C Furnace에서 열처리하여 LATP 합성 분말을 제작하였다. 이온 전도도와 기계적 강도를 달성하기 위해 750~850 °C Furnace에서 열처리 공정을 수행하였다 [11-16]. 5°C/min의 승온 속도로 250~550 °C Furnace에서 12시간 동안 단계적인 열처리 공정을 통해 입자 간 접촉 면적을 최대화하였다.

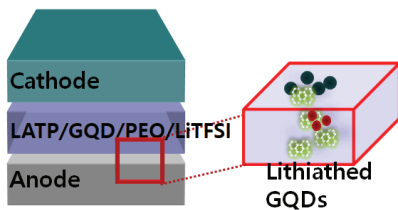


Fig. 1. Schematic of cell configuration containing LATP-GQD-PEO-LiTFSI layer.

고밀도 고체 전해질 층 제작을 위해, PEO poly(ethylene oxide) / LiTFSI 층은 80 °C에서 24시간 동안 진공 건조하였고, 서로 다른 함량의 I₂를 10 mL CH₃CN에 용해시킨 다음 24시간 동안 일정하게 교반하였다. 위와 같이 제작된 고체 고분자 전해질 구조 시료는 미세구조분석 및 전기화학적 측정 전에 아르곤으로 채워진 글로브 박스로 이동하여 최종 셀을 제작하였다.

2.2 소자 특성 분석 및 측정

HRTEM (High-resolution Transmission Microscopy) (FEI Tecnai F30 S-Twin)을 사용하여 GQD-PEO-LiTFSI 고체 전해질 내 이중계면 결함구조에 대해 형태학적 및 나노 구조 분석을 각각 수행하였다.

3. 결과 및 고찰

Fig. 2 (a) 는 수정된 폴리에틸렌 옥사이드 Poly(ethylene oxide) (PEO) 구조의 I₂ 함량에 따른 시료의 전기적 특성을 나타내었다. PEO 구조내 이온 제어를 위해, 각기 다른 GQD-I₂ 함량 기반 PEO-LiTFSI의 1, 1.5 및 2.5 wt%을 갖는 전해질의 이온 전도도를 측정하였다. 샘플 구조의 이온 전도도는 온도에 의존한다는 것을 알 수 있었다 [17-19]. As상태의 PEO-LiTFSI와 비교하여 2.5 wt% I₂ 45°C에서 PEO-LiTFSI 전해질에 첨가되었을 때 생성된 전해질은 이온 전도도가 $6.2 \times 10^3 \text{ S cm}^{-1}$ 에서 $1.8 \times 10^4 \text{ S cm}^{-1}$ 로 증가하는 것을 확인하였다. 이온 전도도는 변형된 PEO-GQD 기반 전해질의 온도가 변화함에 따라 선형적으로 조절되는 경향을 나타내었다.

Fig. 2 (b)는 이온 전도도에 대한 I₂의 영향을 확인하기 위해 라만 분광법을 수행하였다. 187 cm⁻¹에서의 특성 밴드는 I₂에 속하지만, 이러한 특성 피크는 GQD-modified PEO-LiTFSI-1 wt% I₂ 샘플에서 관찰되지 않았다. 대조적으로, GQD-modified PEO-LiTFSI-2.5wt% I₂ 샘플에서, I₂원자 구조 단위의 대칭 스트레칭 모드의 활성화로 인해 123 cm⁻¹ 과 205 cm⁻¹ 사이의 유의한 밴드가 관찰되었다. 이는 요오드가 GQD로 변형된 PEO 고분자 구조에서 I₂ 형태가 아닌 I₃ 형태로 존재함을 나타낸다 [20-22]. 아세토니트릴에 용해된 I₂의 분광분석을 통해 I₃의 성질을 확인하였다. I₃와 관련된 142 cm⁻¹ 피크와 달리 I₂의 특징적인 185 cm⁻¹ 피크가 우세하였다.

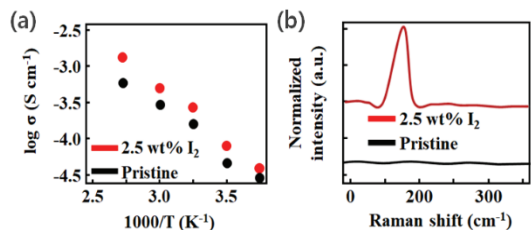


Fig. 2. (a) Ionic conductivities of the GQD-PEO-based electrolyte with Iodine (I₂) contents. (b) Raman spectra of pristine PEO and GQD-modified PEO-Lithium bis(trifluoromethanesulphonyl) imide (LiTFSI)-2.5 weight (wt) %.

이 결과에 따르면, F 는 주로 GQD에 의해 제어되는 반응에서 I_2 와 PEO 사이의 상호작용에 의해 생성됨을 알 수 있었다.

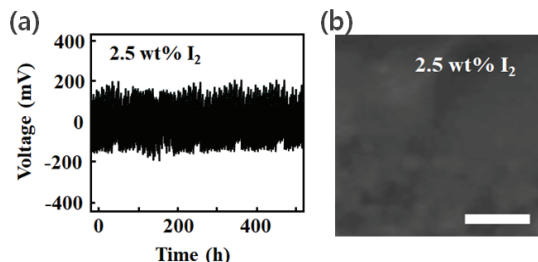


Fig. 3. (a) Voltage profiles of symmetric cells with different electrolytes interlayer operated at a current density of 0.5 mA cm^{-2} and $40 \text{ }^\circ\text{C}$. (b) Morphology of cycled Li metal anodes. Top view SEM images of cycled Li anode using pristine and GQD-PEO-LiTFSI-2.5 wt% I_2 electrolyte in low-magnification. Scale bar, 500 nm.

Fig 3 (a) 와 (b) 는 GQD-PEO-LiTFSI 전해질을 사용하는 전지의 평균 과전위가 125mV 이고 145시간의 제한된 사이클 수명을 나타냄을 보여주었다. 주사 전자 현미경 (Scanning Electron Microscope, SEM)에 의한 Li 층의 미세 표면 구조는 반복적인 충전/방전 주기 동안 과전위의 급격한 하락이 발생하여 경계결함을 나타내었다. void 결함은 Li^+ 이온 확산을 억제하고 헤테로 계면 구조에서 Li 덴드라이트의 형성을 가속화하였다 [23-25]. 그 결과 수명, 내구성 등 디바이스 성능이 저하되었다. 대조적으로, GQD로 수정된 PEO-LiTFSI- $x \text{ wt}\% I_2$ ($x = 1$ 및 2.5) 전해질을 사용하는 디바이스는 개선된 사이클링 안정성을 나타내었다. 계면 Li 열처리 및 박리 공정을 통해 GQD로 개질된 PEO-LiTFSI- $2.5 \text{ wt}\% I_2$ 전해질과 Li 금속 사이의 계면에서 조밀한 구조적 결합이 개선되었다. 특히, GQD로 수정된 PEO-LiTFSI- $2.5\text{wt}\% I_2$ 전해질은 150 시간 이상의 수명과 53 mV 의 다소 낮은 평균 과전위를 가져서 무시할 수 있는 분극을 나타내었다. Li 금속 양극은 표면 및 계면에서 심각한 결함 없이 균일한 표면과 안정적인 사이클링 성능을 보였다. GQD로 수정된 PEO-LiTFSI- $2.5\text{wt}\% I_2$ 전해질은 0.25mA cm^{-2} 의 낮은 분극을 나타내었다. 더욱이, $2.5\text{wt}\% I_2$ 이온을 포함하는 전해질로 구성된 장치의 배터리 성능은 0.5 , 1.0 및 $3 \text{ wt}\%$ 비율에서 I_2 이온을 포함하는 셀보다 우수하였다. 그러나 F 는 Li 계면과 GQD- Li_2O 로 불균형하게 구성된 불안정한 Li 미세구조와 화학적으로 반응하였고, I_2 이온의 불안정한 구조는 활성 Li 미세구조의 부식을 일으키며, 이는 Li 층과 GQD 사이의 접촉 문제와 경계저항에 대한 성능 저하를 초래하였다.

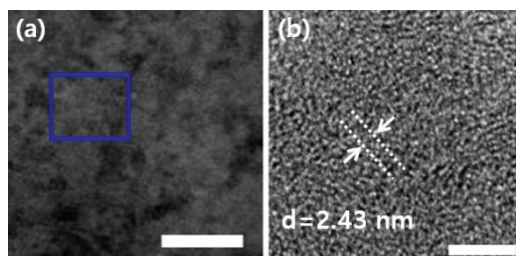


Fig. 4. (a) TEM images of the distribution of the Solid Electrolyte Interphase (SEI) components with GQD-PEO-LiTFSI-2.5 wt% I_2 electrolyte. Scale bar, 500 nm. (b) corresponding high-resolution transmission electron microscopy (HR-TEM) images obtained in the blue rectangular region of (a), Scale bar, 2 nm.

Fig 4는 표면에 GQD로 수정된 I_2 도핑 메커니즘과 계면 안정성을 확인하기 위해 투과전자현미경 (TEM) 을 측정하여 계면의 형태와 구성을 관찰하였다. 그림 4 (a)의 저배율 TEM 이미지는 I_2 도핑 없이 관찰된 계면을 나타내었고, 그림 4 (b)의 파란색 및 노란색 사각형 영역의 고배율도 TEM (HR-TEM) 이미지에서 결정질 Li 층과 GQD- Li_2O 영역을 확인하였다. 또한 PEO-LiTFSI 전해질과 Li 양극 사이의 계면에서 높은 산소 함량과 산소 원자가 Li_2O 구조를 형성하였다. I_2 도핑이 없는 경우와 비교하여 계면에서 결합 구조가 증가하지 않았다. Li_2O 및 GQD 나노 결정 영역과 비정질층이 혼합된 것을 볼 수 있고, I_2 도핑된 유무가 층이 관찰되었다. Li, Li_2O , LiI 및 LiI_3 에 해당하는 결정 구조와 격자 간격이 2.46 \AA 인 Li 층, 2.72 및 2.43 \AA 의 격자 간격은 $\text{Li}_2\text{O}(111)$ 및 GQD 평면에 해당한다. Li_2O 구조와 Li_2O 도메인의 표면에 분포된 LiI 층은 Li와의 고체 고분자 전해질 Solid polymer electrolytes (SPEs) 계면 반응물로 판단된다 [26-29]. LiI 구조는 I_2 -와 $\text{Li/GQD-Li}_2\text{O}$ 사이의 급격한 반응으로 인해 형성되었고, LiI_3 의 형성은 F 도핑 및 Li_2O 함량에 따라 다른 계면 반응을 통해 발생하였다. 이는 Li 형성 후 계면에서 다양한 나노 구조의 형상으로 확인할 수 있었다. GQD 기반 I_2 도핑이 변형된 SEI 계면층 (LiI/GQD-LiI_3)의 구성에 의해 Li 층의 균일한 형성을 달성할 수 있음을 알 수 있다. GQD로 수정된 I_2 는 계면에서 Li 및 Li_2O 와 반응하여 활성화된 Li^+ 이온을 생성하고 이는 결합이 없는 안정적인 계면으로 이어지며 헤테로구조에서 Li^+ 이온 전도를 향상시킬 수 있다 [30].

Fig 5 (a) 는 GQD-PEO-LiTFSI- $2.5\text{wt}\% I_2$ 전해질을 포함하는 전고체 배터리의 사이클링 안정성을 나타내었다. 전류가 50 에서 $100\mu\text{A cm}^{-2}$ 로 변화할 때 GQD-PEO-LiTFSI- $2.5 \text{ wt}\% I_2$ 의 specific capacity는 145mAh g^{-1} 를 유지하였다. $200\mu\text{A cm}^{-2}$ 에서 GQD-PEO 층의 전기화학적 안정성에 대한 평가는

GQD-PEO-LiTFSI-2.5wt% Li 전지에서 사이클링 테스트로 수행하였고, 140mAh g⁻¹ 이상의 안정화된 용량은 50 사이클 동안 활성화 반응을 나타내었다.

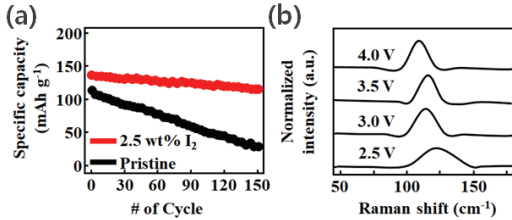


Fig. 5. Electrochemical performance of solid-state batteries with GQD-PEO-LiTFSI-2.5 wt% I₂ electrolyte. (a) cycling stability, and (b) Raman characterization of the interphase between GQD-PEO electrolyte and Li metal.

Fig 5 (b) 는 수정된 원자층 계면의 조성과 요오드 종의 화학 반응에 대한 라만 스펙트럼 결과를 나타내었다. GQD-PEO 기반 셀 구조에서 나타나는 중간상의 구성 요소는 Li₂O와 비정질 복합 고분자이고, 이 중간 상은 이온 전도에 대한 저항의 큰 원인이 되었다 [31,32]. GQD로 수정된 I₂ 도핑으로 헤테로구조 계면에서의 산소 함량과 Li₂O의 산소 함량에는 큰 변화가 없었다. 결과적으로, GQD-변형 전고체 전해질과 Li 구조 사이의 결합을 제어할 수 있는 GQD 기반 I₂도핑된 헤테로 계면의 조성은 고안정성 특성을 나타내었다.

4. 결 론

본 연구에서는 GQD 적용에 따른 리튬이온 배터리의 미세 구조와 결합 특성에 의한 구조적/전기적 특성을 확인하였다. 미세구조 분석을 통해 전고체 전해질내GQD 적용에 따른 리튬 표면과 계면에서의 결합 구조가 감소하는 것을 확인하였다. 계면 저감 구조의 전고체 이차 전지는 GQD 기반의 변형된 I₂ 도핑이 GQD로 전도성이 높은 변형된 SEI 층의 구조화에 안정적 구조화에 영향을 주었으며, 요오드 산화환원 반응에 의한 Li/Li₂O 구조의 형성과 관련이 있음을 나타낸다. 결과적으로 Li 양극과 계면내 결합 감소 역할을 하는 GQD-PEO 고체전해질 사이의 이중 계면 임피던스가 감소하였고, 이중 미세구조 설계를 통해 고안정성 전고체 계면 제어가 가능함을 확인하였다.

참고문헌

1. K. Xu, "Electrolytes and Interphases in Li-Ion Batteries and Beyond" Chemical Reviews, vol. 114, no. 23, pp.11503–11618, 2014.
2. Z. Yu, D. G. Mackanic, Y. Cui and Z. Bao, "A Dynamic, Electrolyte-Blocking, and Single-Ion-Conductive Network for Stable Lithium-Metal Anodes," Joule, vol. 3, no. 11, pp. 2761–2776, 2019.
3. X. Xu, Z. Wen, X. Wu, X. Yang and Z. Gu, "Lithium Ion-Conducting Glass-Ceramics of Li_{1.5}Al_{0.5}Ge_{1.5}(PO₄)_{3-x}Li₂O (x=0.0–0.20) with Good Electrical and Electrochemical Properties," Journal of the American Ceramic Society, vol. 90, no. 9, pp. 2802-2806, 2007.
4. D. Lin, Y. Liu, Z. Liang, J. Xie and Y. Cui, "Layered reduced graphene oxide with nanoscale interlayer gaps as a stable host for lithium metal anodes," Nature Nanotechnology, vol.11, pp. 626–632, 2016.
5. A. Manthiram, X. Yu and S. Wang, "Lithium battery chemistries enabled by solid-state electrolytes," Nature Reviews Materials, vol. 2, no. 16103, pp. 1–16, 2017.
6. P. G. Bruce and A. R. West, "The A-C Conductivity of Polycrystalline LISICON, Li₂+2x Zn_{1-x} GeO₄, and a Model for Intergranular Constriction Resistances patterns," Journal of The Electrochemical Society, vol. 130, no. 3, pp. 662–663, 1983.
7. A. Emly, E. Kioupakis and A. Van der Ven, "Phase Stability and Transport Mechanisms in Antiperovskite Li₃OCl and Li₃OBr Superionic Conductors," Chemistry of Materials, vol. 25, no. 23, pp. 4663-4670, 2013.
8. X. Han, Y. Gong, K. K. Fu, E. D. Wachsman and L. Hu, "Negating interfacial impedance in garnet-based solid-state Li metal batteries," Nature Materials, vol. 16, pp. 572–579, 2017.
9. F. Mizuno, A. Hayashi, K. Tadanaga and M. Tatsumisago, "A large area flexible array sensors using screen printing technology," Advanced Materials, vol. 17, no. 7, pp. 918–921, 2005.
10. M. Matsuo, Y. Nakamori, S.-i. Orimo, H. Maekawa and H. Takamura, "Lithium superionic conduction in lithium borohydride accompanied by structural transition," Applied Physics Letters, vol. 91, no. 22, pp. 224103–224106, 2007.
11. W. Liu, S. W. Lee, D. Lin, A. D. Sendek and Y. Cui, "Enhancing ionic conductivity in composite polymer electrolytes with well-aligned ceramic nanowires," Nature Energy, vol. 2, no. 17035, pp. 1–7, 2017.
12. J. S. Thokchom and B. Kumar, "Composite effect in superionically conducting lithium aluminium germanium phosphate based glass-ceramic," Journal of Power Sources, vol. 185, no. 1, pp. 480–485, 2008.
13. M. Guin, S. Indris, M. Kaus, H. Ehrenberg and O.

- Guillon, "Stability of NASICON materials against water and CO₂ uptake" *Solid State Ionics*, vol. 302, no. 1, pp. 102–106, 2017.
14. J. H. Lee, "A Study of Dynamic Properties of Graphene-Nanoribbon Memory", *Journal of Semiconductor & Display Technology*, v.13, no.2, pp.53-56, 2014.
 15. S. Jung, Y. S. Kim, K. H., "Effect of Post-annealing Treatment on Copper Oxide based Heterojunction Solar Cells", *Journal of Semiconductor & Display Technology*, v.19, pp.55-59, 2020.
 16. Choi, J. Roh, S.Seo, Hwa-II., "A Study on Application of Ag Nano-Dots and Silicon Nitride Film for Improving the Light Trapping in Mono-crystalline Silicon Solar Cell", *Journal of Semiconductor & Display Technology*, v.18, pp.12-17, 2019.
 17. Z. Sun, L. Liu, Y. Lu, J. Zhao and H. An, "Preparation and ionic conduction of Li_{1.5}Al_{0.5}Ge_{1.5}(PO₄)₃ solid electrolyte using inorganic germanium as precursor," *Journal of the European Ceramic Society*, vol. 39, no. 2, pp. 402-408, 2019.
 18. P. Hartmann, T. Leichtweiss, M. R. Busche, P. Adelhelm and J. Janek, "Degradation of NASICON-Type Materials in Contact with Lithium Metal: Formation of Mixed Conducting Interphases (MCI) on Solid Electrolytes," *The Journal of Physical Chemistry C*, vol. 117, no. 41, pp. 21064–21074, 2013.
 19. J. A. Lewis, F. J. Q. Cortes, M. G. Boebinger, M. Chi and M. T. McDowell, "Interphase Morphology between a Solid-State Electrolyte and Lithium Controls Cell Failure" *ACS (American Chemical Society) Energy Letter*, vol. 4, no. 2, pp. 591-599, 2019.
 20. Y. Liu, C. Li, B. Li, H. Song and P. He et al., "Germanium Thin Film Protected Lithium Aluminum Germanium Phosphate for Solid-State Li Batteries," *Advanced Energy Materials*, vol. 8, no. 16, pp. 1702374-1702379, 2018.
 21. Z. Zhang, S. Chen, J. Yang, P. Cui and X. Xu, "Stable cycling of all-solid-state lithium battery with surface amorphized Li_{1.5}Al_{0.5}Ge_{1.5}(PO₄)₃ electrolyte and lithium anode," *Electrochimica Acta*, vol. 297, no. 1, pp. 281–287, 2019.
 22. S. K. Singh, H. Gupta, Y. L. Verma and R. K. Singh, "Improved electrochemical performance of EMIMFSI ionic liquid based gel polymer electrolyte with temperature for rechargeable lithium battery," *Energy*, vol. 150, no. 1, pp. 890–900, 2018.
 23. D. R. MacFarlane, M. Forsyth, P. C. Howlett, S. Zhang and J. Zhang, "Ionic liquids and their solid-state analogues as materials for energy generation and storage," *Nature Reviews Materials*, vol. 1, no. 15005, pp. 1–10, 2016.
 24. I. A. Shkrob, T. W. Marin, Y. Zhu and D. P. Abraham, "Why Bis(fluorosulfonyl)imide Is a Magic Anion for Electrochemistry" *The Journal of Physical Chemistry C*, vol. 118, no. 34, pp. 19661–19671, 2014.
 25. S. Xiong, K. Xie, E. Blomberg, P. Jacobsson and A. Matic, "Analysis of the solid electrolyte interphase formed with an ionic liquid electrolyte for lithium-sulfur batteries," *Journal of Power Sources*, vol. 252, no. 1, pp. 150-155, 2014.
 26. Y. Lu, Z. Tu and L. A. Archer, "Stable lithium electrodeposition in liquid and nanoporous solid electrolytes," *Nature Materials*, vol. 13, no. 1, pp. 961–969, 2014.
 27. P. Jankowski, N. Lindahl, J. Weidow, W. Wiczcerek and P. Johansson, "Impact of Sulfur-Containing Additives on Lithium-Ion Battery Performance: From Computational Predictions to Full-Cell Assessments," *ACS (American Chemical Society) Applied energy materials*, vol. 1, no. 6, pp. 2582–2591, 2018.
 28. H. Yildirim, J. B. Haskins, C. W. Bauschlicher and J. W. Lawson, "Decomposition of Ionic Liquids at Lithium Interfaces. 1. Ab Initio Molecular Dynamics Simulations," *The Journal of Physical Chemistry C*, vol. 121, no. 51, pp. 28214–28234, 2017.
 29. A. J. Louli, L. D. Ellis and J. R. Dahn, "Operando Pressure Measurements Reveal Solid Electrolyte Interphase Growth to Rank Li-Ion Cell Performance," *Joule*, vol. 3, no.3, pp. 745-761, 2019.
 30. J. Nordström, L. Aguilera and A. Matic, "Effect of Lithium Salt on the Stability of Dispersions of Fumed Silica in the Ionic Liquid BMImBF₄," *Langmuir*, vol. 28, no. 9, pp. 4080–4085, 2012.
 31. B. Commarieu, A. Paoella, J.-C. Daigle and K. Zaghib, "Toward high lithium conduction in solid polymer and polymer–ceramic batteries," *Current Opinion in Electrochemistry*, vol. 9, no. 1, pp. 56–63, 2018.
 32. F. Sagane, T. Abe and Z. Ogumi, "Electrochemical Analysis of Lithium-Ion Transfer Reaction through the Interface between Ceramic Electrolyte and Ionic Liquids," *Journal of The Electrochemical Society*, vol. 159, no. 11, pp. 1766–1770, 2012.

접수일: 2022년 9월 14일, 심사일: 2022년 9월 19일,
게재확정일: 2022년 9월 22일