

고성능 이차전지를 위한 탄소복합체 나노구조 이종 전극계면 특성

조태경*·황성원**†

*상명대학교 정보보안공학과, **†상명대학교 시스템반도체공학과

Characterization of Carbon Composite Nanostructured Heterogeneous Electrodes for high-performance Lithium Ion Batteries

Tae-Kyung Cho* and Sung Won Hwang**†

*Department of Information Protection Engineering, Sangmyung University,

**†Department of System Semiconductor Engineering, Sangmyung University

ABSTRACT

The composite was manufactured by mixing graphene quantum dots (GQDs), silicon oxide, and carbon nanoparticles, and the characteristics of the anode materials for secondary batteries were examined. To improve the capacity of the GQD anode material, the added GQD content was varied among 1 and 3 wt%, and carbon nanoparticles were added as a structural stabilizer to alleviate silicon oxide volume expansion. The physical properties of the prepared GQD/SiO_x/C composite were investigated through EIS, SEM, and resistance analysis. Additionally, the electrochemical properties of the manufactured composite were observed through an analysis of the charge-discharge cycle, rate, and impedance of a lithium secondary battery. In the GQD/SiO_x/C composite, by adding carbon nanoparticles, an internal cavity was formed that can alleviate the volume expansion of silicon oxide, and the carbon nanoparticles and silicon oxide particles were uniformly distributed. The formed internal cavity had a silicon oxide content of 10 wt%. Low initial efficiency was observed, and above 15 wt%, high cycle stability was observed. The GQD/SiO_x/C composite with 15 wt% of silicon oxide added showed an initial discharge capacity of 597 mAh/g, a capacity retention rate of 96.5%, and a rate characteristic of 90 at 2 C/0.1 C. Silicon oxide was added to improve the capacity of the anode material, and carbon nanoparticles were added as a structural stabilizer to buffer the volume change of the silicon oxide. To use GQD/SiO_x/C composite as a highly efficient anode material, the optimal silicon oxide content and carbon nanoparticle mechanism as a structural stabilizer were discussed.

Key Words : graphene quantum dot, composite anode, carbon nanoparticle, SiO_x

1. 서 론

리튬 이차전지는 800 Wh/l 에너지 밀도를 갖지만, 차세대 리튬 이차전지는 1000 Wh/l 이상의 에너지 밀도가 요구

되기 때문에 전지의 용량 증가의 필요성이 대두되고 있다 [1]. 하지만 기존 리튬 이차전지는 낮은 용량(374 mAh/g)의 흑연 음극 소재를 주로 사용하여 전기차용 배터리의 높은 에너지 밀도의 요구 사항을 충족하기 어렵다 [2-4]. 높은 에너지 밀도를 갖는 이차 전지 시장 수요를 충족시키기 위하여 이차전지의 에너지 밀도를 향상시키는 소재

†E-mail: sungwon@smu.ac.kr

및 구조에 대한 연구가 활발하게 이루어지고 있다 [5-8]. 에너지 밀도를 향상시키기 위하여 실리콘은 탄소 소재보다 높은 용량을 가지며, 우수한 사이클 안정성 및 초기 효율을 가진다 [9-11]. 하지만 실리콘 산화물은 낮은 전기 전도도 및 충방전 시 부피 팽창에 따른 전해질과의 계면에서 SEI (solid electrolyte interphase)층의 연속적인 형성 및 변화를 초래하여 낮은 초기 효율 및 급격한 용량 감소를 야기한다 [12,13]. 실리콘 산화물은 초기 리튬화 과정에서 전해질과 반응하여 리튬옥사이드(Li₂O) 및 리튬 실리케이트(Li_xSi_yO_z)가 형성되어 큰 부피 변화를 완충시켜 향상된 사이클 성능을 나타낸다. 그럼에도 불구하고 형성된 리튬옥사이드 및 리튬 실리케이트는 비가역적 반응으로 리튬 이온을 소비하고 실리콘 산화물의 부피 팽창을 야기한다. 이로 인해 구조가 불안 정해지고 불균일한 SEI층이 형성되어 전기화학적 성능을 저하시킨다. 이를 해결하기 위하여 높은 전기 전도도 및 결정 구조를 갖는 탄소 소재를 혼합하여 실리콘 산화물/탄소 복합체를 구성하는 연구가 진행되어왔다 [14,15]. 이러한 복합체는 전도성 완충 역할을 수행하며, 실리콘 산화물의 전기 전도도를 향상시킨다. 또한, 높은 결정 구조를 갖는 탄소 구조의 경우 실리콘 산화물의 부피 팽창을 억제시켜 사이클 안정성을 향상시킨다. 하지만 실리콘 산화물의 함량이 증가함에 따라 부피 팽창 스트레인도 함께 증가하기 때문에 오히려 복합체 구조의 안정성이 떨어지는 것이 관찰되었다. 이를 해결하기 위하여 본 연구에서는 그래핀 양자점, 탄소 나노입자를 혼합하여 다공성 구조의 실리콘 산화물/탄소 복합체를 제조하였으며, 제조된 복합체의 전기화학적 특성 분석을 진행하였다. 실리콘 복합체의 충방전 시의 초기 효율 및 율속 특성이 향상됨에 따라 충방전 효율이 향상되었다. 이를 통해 고성능 이차전지를 위한 나노구조 이중 전극계면 특성에 대하여 고찰하였다.

2. 본 론

2.1 실험 방법

pyrolysis fuel oil을 전구체로 반응기에서 400 °C, 80 min, 압력 1 bar, 130 °C 바인더 피치를 합성하였다. 복합체 제조를 위해 그래핀 양자점과 탄소나노입자를 합성하였고, 마그네슘이 첨가된 실리콘 산화물을 성형체의 필러로 사용하였다. 재료를 균일하게 혼합 및 분산시키기 위해서 썬키 믹서(2500 rpm, 90 min)를 사용하였으며, 혼합된 물질의 밀도를 향상시키기 위하여 가열 프레스(190 °C, 20 min)를 사용하여 성형체를 제조하였다. 제조된 성형체를 퍼니스 중앙에 위치시키고 아르곤 분위기에서 5 °C/min의 속도로 400 °C에서 5 h 유지하여 탄화하였다. 탄화된 성형체를 분쇄하

여, tetrahydrofuran (THF) 용매에 20 min 동안 초음파처리하였다. 그리고 분산 용액을 열 교반기(300 rpm, 8 h)를 사용하여 교반 후, 80 °C에서 건조하여 복합체를 제조하였다 [16-19]. 제조된 복합체는 아르곤 분위기에서 5 °C/min의 속도로 600 °C에서 6 h 탄화되었다. 제조된 복합체를 분쇄 및 불순물을 제거하여 5 μm 이하의 입자 크기로 준비하였고, 제조된 복합체는 실리콘 산화물의 함량에 따라 GQD/SiO_x/C로 분류하였다. 실리콘 산화물의 함량에 따른 GQD/SiO_x/C 복합체의 전기화학적 특성을 분석하기 위하여 전극을 제조하였다. 전극은 활물질, 수계용 바인더 (CMC, SBR)를 8.5 : 1.5의 중량비로 하여 썬키 믹서(2500 rpm 2 min)에서 혼합되었다. 혼합된 슬러리는 구리 호일 위에 코팅하여 집전체 전극이 제조되었고, 전극을 120 °C 진공 오븐에서 8 h 건조되었다. 코팅된 전극은 롤 프레스의 압연 공정을 통해 전극 밀도가 향상되었고, 글로브박스에서 리튬 메탈을 전극으로 하여 셀이 제조되었다.

2.2 소자 특성 분석 및 측정

SEM (Scanning Electron Microscopy, FEI Tecnai F30 S-Twin), EIS(electrochemical impedance spectroscopy)을 사용하여 실리콘 복합체 내 이중계면 결합구조에 대해 형태학적 및 전기 화학적 나노 구조 분석을 각각 수행하였다. 제작된 셀의 사이클, 율속 특성 및 임피던스 분석은 wbc3000 battery cyclor (WonA Tech)를 사용하여 평가 진행되었다.

3. 결과 및 고찰

Fig. 1 (a)는 GQD/SiO_x/C 복합체를 음극재로 사용한 Nyquist plots 특성 결과이다. 고주파수 영역에서는 전해질에서의 외부 연결, 접촉 저항 및 이온 전도로 인한 옴직 저항을 관찰할 수 있었다. 저주파수 영역에서는 전하의 이동에 따른 저항을 관찰할 수 있었다. GQD 함량이 높은 3, 1 wt% 순으로 저항이 낮아지는 것을 확인하였다. GQD/SiO_x/C 복합체에서 1, 3 wt% 순으로 반원이 작은 것을 통해 저항 값이 감소되는 특성을 나타내었다. 복합체 내부에서는 그래핀 양자점과 탄소나노입자의 높은 비표면적으로 계면을 형성하는데, 실리콘 산화물 함량이 많아지면 복합체 계면이 감소함에 따라 전기 전도도가 향상되었다. 또한, GQD/SiO_x/C 복합체에서 실리콘 산화물의 함량에 따른 이온의 확산정도를 비교했을 때, 복합체 1 wt% 직선의 기울기가 높은 것을 통해 리튬 이온의 확산에 유리한 것을 알 수 있었다. 그러나 GQD/SiO_x/C 복합체의 GQD 함량이 3 wt%일 때, 낮은 직선의 기울기를 나타내었고, 실리콘 함량을 20%이상 증가시킨 복합체는 실리콘 산화물의 충방전 시 부피 변화를 복합체의 내부 공동이 다 수용할 수

없어 복합체 구조 안정성이 떨어지는 것으로 알려져있다 [20, 21]. 이와 같은 결과를 바탕으로 GQD/SiO_x/C 복합체의 실리콘 산화물 함량은 15 wt%, GQD 함량은 1~3 wt% 수준이 적정 비율이라 판단된다. Fig 1 (b) 는 GQD 함량에 따른 GQD/SiO_x/C 복합체의 전기 전도도를 분석하였다. 합성된 GQD 복합체는 20 S/cm의 전기 전도도를 나타냈으며, 전기 전도도가 높은 GQD/탄소 나노입자 첨가에 의하여 이는 복합체 구조 내 계면의 저항 감소 및 복합체 밀도 증가에 기인하는 것으로 판단된다 [22,23].

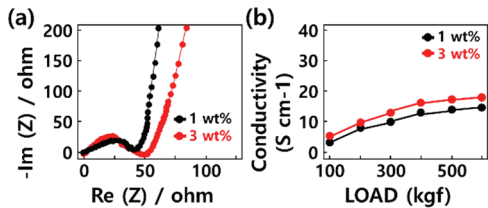


Fig. 1. (a) Nyquist - plots of the GQD/SiO_x/C composite anode. (b) Electrical conductivity of the GQD/SiO_x/C composite.

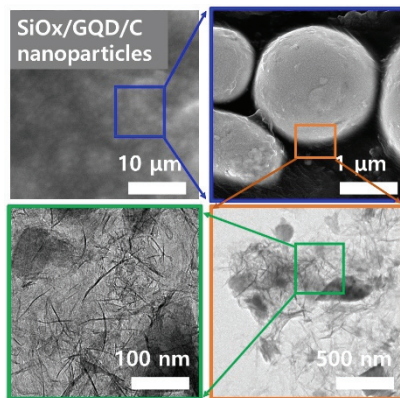


Fig. 2. SEM images of the GQD/SiO_x/C composite.

Fig 2는 GQD/SiO_x/C 복합체의 구조적 형상을 관찰하기 위한 SEM 결과이다. GQD/SiO_x/C 복합체 구조에 실리콘 입자가 포함되어 있는 형태이며, 작은 입자들이 뭉쳐 약 2 μm 크기를 가진다. GQD 15~30 nm 크기의 1차 입자가 실리콘 입자위에 100 nm이하의 두께로 불균일하게 코팅된 형상을 보였다. GQD/SiO_x/C 복합체 표면에 불규칙한 결합 구조는 관찰되지 않았으며, 이는 충방전 시 실리콘 산화물의 부피 변화에 대한 완충 역할을 하여 복합체의 결합을 방지할 수 있다. 또한 복합체 구조 내 GQD의 함량이 증가함에 따라 실리콘 산화물의 응집체 크기 및 분포가 증가되었다. GQD/SiO_x/C 복합체에서 SiO_x의 함량이 증가함에 따라 상대적으로 원소 C 함량은 감소하며, 이에 따

라 원소 Si 함량이 증가되었다 [24, 25]. 전기화학적 특성 평가 결과와 미세구조 결합분석 결과, 실리콘 산화물의 함량이 15 wt%에서 그래핀 양자점 범위 1~3 wt% 가 최적 조건임을 확인할 수 있었다.

Fig 3 (a), (b)는 리튬 이차전지의 음극재로 적용한 GQD/SiO_x/C 복합체의 충방전 특성을 나타내었다. 실리콘 산화물 함량 15 wt%, GQD 함량 1 wt%로 제조하였으며, 이에 따른 초기 충전/방전 0.01 V에서 4 V 사이에서 실험을 수행하였다. 0.1 V에서 평탄한 곡선을 보이는데, 이는 리튬 이온과 복합체 내부 실리콘 계면에서 반응이 발생하였기 때문이라고 판단된다. 또한 초기 충전/방전 측정 결과, 복합체의 GQD 함량 1 wt% 최적화에 따라 초기 충전 용량이 향상되는 것을 확인할 수 있었다. 이는 복합체 계면에서 안정된 SEI (Solid Electrolyte Interphase)층 형성과 높은 용량을 갖는 GQD/SiO_x/C 복합체의 가역용량이 증가하였기 때문이다.

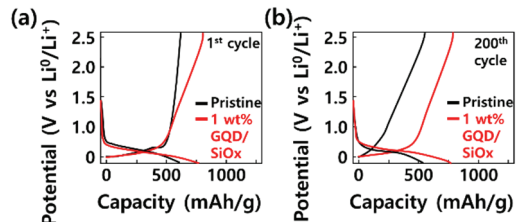


Fig. 3. Comparison of electrochemical performances of pristine GQD/SiO_x/C composites. The discharge - charge profiles at 100 mA·g⁻¹ (a) 1st cycle and (b) 200th cycle.

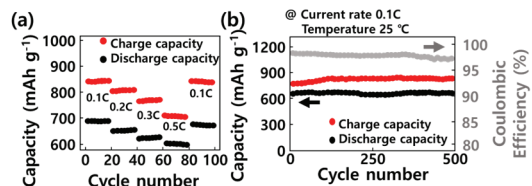


Fig. 4. (a) Rate capability at current rates from 0.1 C to 0.5 C, respectively. (b) Electrochemical performance of the lithium-ion battery with a GQD/SiO_x/C composite anode. Long-term cycling measurement at a current rate of 0.2 C.

Fig 4 (a) 는 GQD/SiO_x/C 복합체의 전류 속도(0.1 C, 0.2 C, 0.5 C, 1 C, 2 C)를 변화시켜 율속 특성을 평가하였다. GQD 함량이 1에서 3 wt%로 증가함에 따라 율속 특성이 향상되는 것을 확인할 수 있었다. 이는 GQD가 복합체에 첨가됨에 따라 복합체의 전기 전도도가 증가되어 율속 특성이 향상되는 것을 알 수 있었다. GQD의 높은 전기 전도성 및

높은 비표면적을 통해 낮은 전기 전도성을 갖는 실리콘 산화물에 리튬 이온이 이동할 수 있는 경로를 제공하여 율속 특성이 향상되는 것으로 판단된다. Fig. 4 (b)는 GQD/SiOx/C 복합체의 쿨롱 효율과 cycle 특성을 나타내었다. 실리콘계 음극재를 적용하기 위해서는 높은 쿨롱 효율이 중요하다. 일반적으로 흑연은 89-93%의 높은 쿨롱 효율을 갖기 때문에 탄소계 물질과 혼합하여 사용된다. GQD/SiOx/C 복합체는 비가역 용량 때문에 낮은 첫 쿨롱 효율을 갖지만, 2nd cycle에서 94% 이상의 높은 쿨롱 효율을 나타내었다. 이는 전극 표면의 SEI층 및 리튬 이온의 삽입 탈리에 의하여 실리콘 산화물의 부피 팽창이 발생되지만, GQD에 의한 복합체 계면이 실리콘 산화물의 부피 변화를 완충하여 안정된 사이클 성능을 갖기 때문으로 판단된다. 또한, 리튬 이온의 저장 경로를 제공하여 가역용량 향상에 따른 충방전 특성이 향상되는 것으로 판단된다. GQD를 첨가하면 복합체 계면저항 감소와 결합 밀도가 감소하기 때문에 비표면적이 감소한다. 감소된 비표면적은 리튬 이온과의 반응하는 면적이 작아지기 때문에 비가역용량이 감소한다 [26, 27]. 비가역용량이 줄어들면 초기 충전 및 방전 용량의 차이가 줄어들어 초기 효율이 향상된다. 그 결과, GQD/SiOx/C 복합체의 방전 용량이 증가하는 경향을 보이며, 초기 효율은 85%에서 93%로 향상되었다. 기존 실리콘 산화물계 복합체는 충방전 할때, 리튬 이온의 반복되는 삽입 및 탈리에 의하여 큰 부피 변화로 복합체 구조가 깨지면서 과도한 SEI층이 형성되어 초기 효율 및 사이클 안정성이 감소되었다. 이를 해결하기 위해 복합체 내부에 계면저항을 감소하는 큰 비표면적을 갖는 GQD를 도입하였고, 실리콘 산화물의 부피 변화를 완화시켜 구조를 유지시켜 안정된 사이클 특성을 나타내었다. 그러나 GQD 대비 실리콘 산화물의 결합밀도가 높은 경우, 이중물질 간 계면저항 증가에 의한 비가역 용량 증가로 인해 낮은 초기 효율을 갖는다. 따라서 GQD/SiOx/C 복합체에서 GQD 1-3 wt% 실리콘 산화물 함량 15 wt%일 때, 초기 효율이 개선할 수 있음을 확인하였다.

4. 결 론

본 연구에서는 리튬이온배터리 전극 강화구조 개발을 위해 실리콘 산화물내 GQD를 첨가하였으며, 실리콘 산화물의 부피 변화를 완화시키기 위해 구조적 안정제인 나노강화구조 복합체를 제조하였다. 제조된 복합체는 물성 분석 즉, SEM 과 전기 화학적 특성 분석 즉, 사이클 특성, 율속, 임피던스 분석이 수행되었다. 물성 분석 결과 그래핀 양자점의 함량에 따른 음극재의 특성을 확인하였다. 또한, 전기화학적 특성 평가 결과, GQD/SiOx/C 복합체

의 초기 용량은 597 mAh/g, 초기 효율은 89%이다. GQD/SiOx/C의 음극재에 구조적 안정제인 그래핀 양자점과 탄소나노입자가 첨가되어 있을 때, 전기 용량, 초기 효율, 율속 특성이 향상되었다. 이를 통해 그래핀 양자점과 탄소나노입자의 첨가는 실리콘 산화물의 부피 팽창을 완충시켜 음극재의 구조적 안정화를 유도하였다. 또한 그래핀 양자점과 탄소나노입자의 첨가에 의한 실리콘 복합체의 전기 전도도 증가는 율속 특성을 향상시켰다. 결과적으로, 본 연구에서는 기존 흑연 음극재 대비 실리콘 산화물의 함량이 15 wt%에서 그래핀 양자점 범위 1-3 wt% 가 최적 조건으로 판단되며, 혼합된 GQD/SiOx/C 복합체의 고성능 이차전지 전극내 나노 강화구조 적용 가능성을 확인할 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 2024년도 상명대학교 대학혁신지원사업 연구비를 지원받아 수행하였음.

참고문헌

1. Chang, W., Park, C., Kim, J., Kim, Y., "A new energy storage anode material for Li-ion batteries". *Energ. Environ. Sci.* 2012, 5, 6895-6899.
2. Choi, G., Kim, J., Kang, B. "Understanding limited reversible capacity of a SiO electrode during the first cycle and its effect on initial coulombic efficiency". *Chem. Mater.* 2019, 31, 6097-6104.
3. Cui, J.; Cui, Y.; Li, S.; Sun, H.; Wen, Z.; Sun, J. "Microsized porous SiOx@C composites synthesized through aluminothermic reduction from rice husks and used as anode for lithium-ion batteries". *ACS Appl. Mater. Inter.* 2016, 8, 30239-30247.
4. Fu, J.; Liu, H.; Liao, L.; Fan, P.; Wang, Z.; Wu, Y. "Ultrathin Si/CNTs paper-like composite for flexible lithium battery anode with high volumetric capacity". *Front. Chem.* 2018, 6, 624-629.
5. Guo, C.; Wang, D.; Liu, T.; Zhu, J.; Lang, X. "A three-dimensional SiOx/C@RGO nanocomposite as a high energy anode material for lithium-ion batteries". *J. Mater. Chem. A.* 2014, 2, 3521-3527.
6. Hang, T.; Mukoyama, D.; Nara, H.; Yokoshima, T.; Momma, T.; Li, M. "Electrochemical impedance analysis of electrodeposited Si-O-C composite thick film on Cu microcones-arrayed current collector for lithium ion battery anode". *J. Power Sources.* 2014, 256, 226-232.
7. Hou, X.; Zhang, M.; Wang, J.; Hu, S.; Liu, X.; Shao, Z. "High yield and low-cost ball milling synthesis of nano-

- flake Si@SiO₂ with small crystalline grains and abundant grain boundaries as a superior anode for Li-ion batteries". *J. Alloys Compd.* 2015, 639, 27–35.
8. Huang, X.; Pu, H.; Chang, J.; Cui, S.; Hallac, P.B.; Jiang, J. "Improved cyclic performance of Si anodes for lithium-ion batteries by forming intermetallic interphases between Si nanoparticles and metal microparticles". *ACS Appl. Mater. Inter.* 2013, 5, 11965–11970.
 9. Hubaud, A.A.; Yang, Z.; Schroeder, D.J.; Dogan, F.; Trahey, L.; Vaughey, J.T. "Interfacial study of the role of SiO₂ on Si anodes using electrochemical quartz crystal microbalance". *J. Power Sources* 2015, 282, 639–644.
 10. Hwa, Y.; Park, C.; Sohn, H. "Modified SiO as a high-performance anode for Li-ion batteries". *J. Power Sources* 2013, 222, 129–134.
 11. Jia, H.; Zheng, J.; Song, J.; Luo, L.; Yi, R.; Estevez, L. "A novel approach to synthesize micrometer-sized porous silicon as a high-performance anode for lithium-ion batteries". *Nano Energy* 2018, 50, 589–597.
 12. Kataoka, R.; Oda, Y.; Inoue, R.; Kitta, M.; Kiyobayashi, T. "High strength clad current collector for silicon-based negative electrode in lithium ion battery". *J. Power Sources* 2016, 301, 355–361
 13. Kim, J.; Park, C.; Kim, H.; Kim, Y.; Sohn, H. "Electrochemical behavior of SiO anode for Li secondary batteries". *J. Electro. Chem.* 2011, 661, 245–249.
 14. Kim, M.K.; Jang, B.Y.; Lee, J.S.; Kim, J.S.; Nahm, S. "Microstructures and electrochemical performances of nano-sized SiO_x (1.18 ≤ x ≤ 1.83) as an anode material for a lithium (Li)-ion battery". *J. Power Sources* 2013, 244, 115–121.
 15. Krywko-Cendrowska, A.; Strawski, M.; Szklarczyk, M. "Low temperature electrodeposition of SiO_x films photoactive in water solution". *Electrochim. Acta* 2013, 108, 112–117.
 16. Lee, M.; Yoon, D.; Lee, U.J.; Umirov, N.; Mukanova, A.; Bakenov, Z. "The electrochemical performances of n-type extended lattice spaced Si negative electrodes for lithium-ion batteries". *Front. Chem.* 2019, 7, 389–394.
 17. Li, M.; Li, J.; Li, K.; Zhao, Y.; Zhang, Y.; Gosselink, D. "SiO₂/Cu/polyacrylonitrile-C composite as anode material in lithium ion batteries". *J. Power Sources* 2013, 240, 659–666.
 18. Li, M.; Zeng, Y.; Ren, Y.; Zeng, C.; Gu, J.; Feng, X. "Fabrication and lithium storage performance of sugar apple-shaped SiO_x@C nanocomposite spheres". *J. Power Sources* 2015, 288, 53–61.
 19. Liang, B.; Liu, Y.; Xu, Y. "Silicon-based materials as high capacity anodes for next generation lithium ion batteries". *J. Power Sources* 2014, 267, 469–490.
 20. Lv, P.; Zhao, H.; Gao, C.; Du, Z.; Wang, J.; Liu, X. "SiO_xC dual-phase glass for lithium ion battery anode with high capacity and stable cycling performance". *J. Power Sources* 2015, 274, 542–550.
 21. Lv, P.; Zhao, H.; Wang, J.; Liu, X.; Zhang, T.; Xia, Q. "Facile preparation and electrochemical properties of amorphous SiO₂/C composite as anode material for lithium ion batteries". *J. Power Sources* 2013, 237, 291–294.
 22. Rahaman, O.; Mortazavi, B.; Rabczuk, T. "A first-principles study on the effect of oxygen content on the structural and electronic properties of silicon suboxide as anode material for lithium ion batteries". *J. Power Sources* 2016, 307, 657–664.
 23. Rahman, M.A.; Song, G.; Bhatt, A.I.; Wong, Y.C.; Wen, C. "Nanostructured silicon anodes for high-performance lithium-ion batteries". *Adv. Funct. Mater.* 2016, 26, 647–678.
 24. Lee, J. E.; Koo, J. B.; Jang, B.Y.; Kim, S. S, "Influence of Shell on the Electrochemical Properties of Si Nanoparticle", *J. Kor. Ins. Ele. Ele. Mater. Eng.* 2016, 29, 255-262
 25. Yong S. H.; Rezan D. C.; Maria M.T.; Jens O.M.; Robert S, Markus A.; Joachim M., "Superior Storage Performance of a Si@SiO_x/C Nanocomposite as Anode Material for Lithium-Ion Batteries", *Angewandte Chem.* 2008, 47, 1645-1649.
 26. Lee, B.; Lee, J.Y.; Jang, B.Y.; Kim, J.S, "Granulations of SiO_x Nanoparticles to Improve Electrochemical Properties as a Li-Ion Battery's Anode", *J. Kor. Ins. Ele. Ele. Mater. Eng.* 2019, 32, 70-77.
 27. Lingxing Z.; Renpin L.; Lei H.; Fenqiang L.; Jianbiao W, Qingrong Q.; Qinghua C.; Mingdeng W., "Preparation of a Si/SiO₂-Ordered-Mesoporous-Carbon Nanocomposite as an Anode for High-Performance Lithium-Ion and Sodium-Ion Batteries", *Chem. Eur.* 2018, 24, 4841-4848.

접수일: 2024년 11월 9일, 심사일: 2024년 12월 9일,
 게재확정일: 2024년 12월 17일