(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 등록특허공보(B1)

(45) 공고일자 2024년01월05일
(11) 등록번호 10-2622286
(24) 등록일자 2024년01월03일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
H01G 11/32 (2013.01) *H01G 11/86* (2013.01)
(52) CPC특허분류
H01G 11/32 (2023.08)
H01G 11/86 (2023.08)
(21) 출원번호 10-2018-7023987
(22) 출원일자(국제) 2017년01월25일
심사청구일자 2022년01월25일
(85) 번역문제출일자 2018년08월21일
(65) 공개번호 10-2018-0099893
(43) 공개일자 2018년09월05일
(86) 국제출원번호 PCT/US2017/014979
(87) 국제공개번호 WO 2017/132282
국제공개일자 2017년08월03일
(30) 우선권주장
62/287,402 2016년01월26일 미국(US)
62/287,403 2016년01월26일 미국(US)
(56) 선행기술조사문헌
US20090305135 A1
US20130021718 A1

(73) 특허권자
더 리전트 오브 더 유니버시티 오브 캘리포니아
미국 94607-5200 캘리포니아주 오클랜드 플랭크린 스트리트 1111 12층
(72) 발명자
후앙, 우
미국 90024 캘리포니아주 로스앤젤레스 로체스터 애비뉴 10826
파판드리아, 벤자민
미국 90025 캘리포니아주 로스앤젤레스 베테란 드라이브 1885
(뒷면에 계속)
(74) 대리인
양영준, 김영

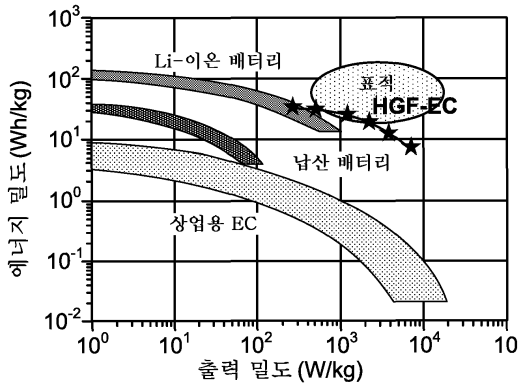
전체 청구항 수 : 총 22 항 심사관 : 김기완

(54) 발명의 명칭 **슈퍼커패시터를 위한 그래핀 프레임워크**

(57) 요 약

본 개시내용은 전류 에너지 저장 기술의 결점을 회피할 수 있는 슈퍼커패시터를 제공한다. 이러한 슈퍼커패시터의 물질 및 제조 공정이 본원에 제공된다. 일부 실시양태에서, 전기화학 시스템이 제1 전극, 제2 전극을 포함하며, 여기서 제1 전극 및 제2 전극 중 적어도 1개는 3차원 다공성 환원 그래핀 옥시드 프레임워크를 포함한다.

대 표 도 - 도1a



(52) CPC특허분류
Y02E 60/13 (2020.08)
(72) 발명자
수, 수
미국 90034 캘리포니아주 로스앤젤레스 에스. 세풀베다 불러바드 3245
두안, 시앙펭
미국 90095 캘리포니아주 로스앤젤레스 카를로스 이. 영 드라이브 이스트 607

명 세 서

청구범위

청구항 1

a) 구멍이 많은 그래핀 시트의 상호연결된 전도성 네트워크로서, 구멍이 많은 그래핀 시트 내에 나노포어가 형성된 것인 상호연결된 전도성 네트워크; 및

b) 황 입자를 포함하는 용량성 또는 슈도-용량성 물질로서, 황 입자는 구멍이 많은 그래핀 시트의 상호연결된 전도성 네트워크 내에 캡슐화되고, 캡슐화는 폴리술피드 왕복을 억제하는 것인 용량성 또는 슈도-용량성 물질

을 포함하는, 구멍이 많은 3D 그래핀 프레임워크를 포함하는 전극이며,

전극의 총 중량 또는 질량의 적어도 60 중량% 또는 질량%의 황 함량을 갖는 전극.

청구항 2

제1항에 있어서, 추가로 집전체를 포함하는 전극.

청구항 3

제1항에 있어서, 450 m^2/g 내지 1,800 m^2/g의 비표면적을 갖는 전극.

청구항 4

제1항에 있어서, 30% 내지 99%의 로딩 비를 갖는 전극.

청구항 5

제1항에 있어서, 500 사이클 내지 2,000,000 사이클의 사이클 수명을 갖는 전극.

청구항 6

제1항에 있어서, 480 mAh/g 내지 1,940 mAh/g의 0.1의 C-레이트에서의 비용량을 갖는 전극.

청구항 7

제1항에 있어서, 90% 내지 99%의 다공성을 갖는 전극.

청구항 8

제1항에 있어서, 나노포어가 1 nm 내지 1,000 nm의 세공 직경을 갖는 것인 전극.

청구항 9

제1항에 있어서, 상호연결된 전도성 네트워크의 구멍이 많은 그래핀 시트가 결합되고 함께 상호결합되어 모놀리식(monolithic)의 기계적으로 강한 3차원 네트워크를 형성하는 것인 전극.

청구항 10

제1항에 있어서, 나노포어가 폴리술피드 왕복을 억제하면서 나노포어를 통한 리튬 이온 수송을 허용하도록 구성된 것인 전극.

청구항 11

제1항에 있어서, 황 입자가 10 nm 내지 100 μm의 크기를 갖는 것인 전극.

청구항 12

a) 제1 전극 및 제2 전극; 및

b) 전해질

을 포함하는 에너지 저장 장치이며;

제1 전극 및 제2 전극 중 적어도 1개는 구멍이 많은 3D 그래핀 프레임워크를 포함하고, 구멍이 많은 3D 그래핀 프레임워크는 구멍이 많은 그래핀 시트의 상호연결된 전도성 네트워크를 포함하고, 구멍이 많은 그래핀 시트 내에 나노포어가 형성되고;

제1 전극 및 제2 전극 중 적어도 1개는 황 입자를 포함하는 용량성 또는 슈도-용량성 물질을 추가로 포함하고, 여기서 황 입자는 구멍이 많은 그래핀 시트의 상호연결된 전도성 네트워크 내에 캡슐화되고, 캡슐화는 폴리술피드 왕복을 억제하고;

제1 전극 및 제2 전극 중 적어도 1개는 전극의 총 중량 또는 질량의 적어도 60 중량% 또는 질량%의 황 함량을 갖는 것인 에너지 저장 장치.

청구항 13

제12항에 있어서, 전해질이 리튬 헥사플루오로포스페이트, 아이오도메탄, 디메틸 술페이트, 디메틸 카르보네이트, 테트라메틸암모늄 클로라이드, 메틸 트리플레이트, 디아조메탄, 메틸 플루오로술포네이트 에틸 아세테이트, 아세톤, 디메틸포름아미드, 아세토니트릴, 디메틸 술폭시드, 니트로메탄, 프로필렌 카르보네이트, 에틸렌 카르보네이트, 리튬 비스(트리플루오로메탄술포닐)이미드, 1,2-디메톡시에탄, 1,3-디옥솔란, 질산리튬 또는 그의 임의의 조합을 포함하는 비-수성 전해질인 에너지 저장 장치.

청구항 14

제12항에 있어서, 16 Wh/kg 내지 750 Wh/kg의 적층-비 에너지 밀도를 갖는 에너지 저장 장치.

청구항 15

제12항에 있어서, 0.5 kW/kg 내지 8 kW/kg의 적층-비 출력 밀도를 갖는 에너지 저장 장치.

청구항 16

제12항에 있어서, 16 Wh/kg 내지 750 Wh/kg의 전극-비 중량측정 에너지 밀도를 갖는 에너지 저장 장치.

청구항 17

제12항에 있어서, 0.5 kW/kg 내지 18 kW/kg의 전극-비 중량측정 출력 밀도를 갖는 에너지 저장 장치.

청구항 18

제12항에 있어서, 50 F 내지 1000 F의 총 정전용량을 갖는 에너지 저장 장치.

청구항 19

제12항에 있어서, 나노포어가 1 nm 내지 1,000 nm의 세공 직경을 갖는 것인 에너지 저장 장치.

청구항 20

제12항에 있어서, 상호연결된 전도성 네트워크의 구멍이 많은 그래핀 시트가 결합되고 함께 상호결합되어 모놀리식의 기계적으로 강한 3차원 네트워크를 형성하는 것인 에너지 저장 장치.

청구항 21

제12항에 있어서, 나노포어가 폴리술피드 왕복을 억제하면서 나노포어를 통한 리튬 이온 수송을 허용하도록 구성된 것인 에너지 저장 장치.

청구항 22

제12항에 있어서, 황 입자가 10 nm 내지 100 μm의 크기를 갖는 것인 에너지 저장 장치.

청구항 23

삭제

청구항 24

삭제

청구항 25

삭제

청구항 26

삭제

청구항 27

삭제

청구항 28

삭제

청구항 29

삭제

청구항 30

삭제

청구항 31

삭제

청구항 32

삭제

청구항 33

삭제

청구항 34

삭제

청구항 35

삭제

청구항 36

삭제

발명의 설명

기 술 분 야

배 경 기 술

[0001] 상호참조

[0002] 본 출원은 2016년 1월 26일에 출원된 미국 가출원 번호 62/287,402 및 2016년 1월 26일에 출원된 미국 가출원 번호 62/287,403의 이익을 청구하고, 이들 출원은 본원에 참조로 포함된다.

[0003] 현대 생활의 빠르게 증가하는 에너지 필요의 결과로, 고성능 전기 에너지 저장 장치의 개발은 상당한 주목을 받고 있다. 슈퍼커패시터는 배터리와 종래 커패시터 사이의 중간적 특성을 갖는 유망한 전기 에너지 저장 장치이며, 그 어느 쪽보다 더 빠르게 향상되고 있다. 지난 수십년에 걸쳐, 슈퍼커패시터는 점점 많은 적용 분야에서 배터리 및 커패시터를 대체함으로써 일상 제품의 주요 부품이 되었다. 이 기술의 미래 성장은 에너지 밀도, 출력 밀도, 사이클 수명 및 제조 비용의 추가 개선에 달려있다.

발명의 내용

[0004] 본 발명자들은 보다 고성능 전기 에너지 저장 장치 (EESD)에 대한 필요에 대한 해결책을 인식하고 제공하였다. 그래핀 물질, 물질의 조성물, 제조 공정 및 개선된 성능을 갖는 장치가 본원에 제공된다. 본원에 기재된 대상의 특색은 높은 출력 밀도 및 탁월한 저온 성능을 제공하며, 예비 전력, 저온 시동, 플래쉬 카메라, 회생 제동 및 하이브리드 전기 차량에 대한 적용을 포함하나 이에 제한되지는 않는다.

[0005] 본원에 기재된 적용 분야는 높은 출력 밀도를 갖는 전자장치 및 에너지 저장 시스템의 영역에서 개선을 제공한다. 많은 종래의 슈퍼커패시터는 낮은 에너지 및 출력 밀도, 및 낮은 사이클링 및 용량성 능력을 나타낸다. 보통의 전자 장치가 무어 (Moore)의 법칙에 따라 매우 빠른 진전을 보였던 반면, 전기 에너지 저장 장치는 높은 전하 저장 용량을 갖는 신규 물질의 결여 때문에 겨우 조금 진전하였다.

[0006] 본 개시내용은 현행 에너지 저장 기술의 결점을 회피할 수 있는 슈퍼커패시터를 제공한다. 이러한 슈퍼커패시터의 물질 및 제조 공정이 본원에 제공된다. 일부 실시양태에서, 전기화학 시스템은 제1 전극, 제2 전극을 포함하며, 여기서 제1 전극 및 제2 전극 중 적어도 1개는 3차원 다공성 환원 그래핀 옥시드 프레임워크를 포함한다. 일부 실시양태에서, 에너지 저장 장치는 제1 전극과 제2 전극 사이에 배치된 전해질을 추가로 포함한다. 일부 실시양태에서, 전해질은 수성 전해질이다. 일부 실시양태에서, 전기화학 시스템은 제1 전극과 제2 전극 사이에 배치된 분리기를 추가로 포함한다. 일부 실시양태에서, 전기화학 시스템은 추가로 집전체를 포함한다.

[0007] 본원에 제공된 한 측면은 다공성 구조 (예를 들어, 계층적 다공성 구조)를 갖는 그래핀 시트의 상호연결된 전도성 네트워크, 및 용량성 또는 슈도-용량성 물질 (pseudo-capacitive material)를 포함하는 3D 그래핀 프레임워크를 포함하는 복합 재료를 포함하는 전극이다.

[0008] 일부 실시양태에서, 3D 그래핀 프레임워크는 구멍이 많은 3D 그래핀 프레임워크를 포함한다.

[0009] 일부 실시양태에서, 전극은 약 450 m^2/g 내지 약 3,000 m^2/g의 비표면적을 갖는다. 일부 실시양태에서, 전극은 적어도 약 450 m^2/g의 비표면적을 갖는다. 일부 실시양태에서, 전극은 최대 약 3,000 m^2/g의 비표면적을 갖는다. 일부 실시양태에서, 전극은 약 450 m^2/g 내지 약 600 m^2/g, 약 450 m^2/g 내지 약 750 m^2/g, 약 450 m^2/g 내지 약 900 m^2/g, 약 450 m^2/g 내지 약 1,050 m^2/g, 약 450 m^2/g 내지 약 1,200 m^2/g, 약 450 m^2/g 내지 약 1,800 m^2/g, 약 450 m^2/g 내지 약 2,200 m^2/g, 약 450 m^2/g 내지 약 2,600 m^2/g, 약 450 m^2/g 내지 약 3,000 m^2/g, 약 600 m^2/g 내지 약 750 m^2/g, 약 600 m^2/g 내지 약 900 m^2/g, 약 600 m^2/g 내지 약 1,050 m^2/g, 약 600 m^2/g 내지 약 1,200 m^2/g, 약 600 m^2/g 내지 약 1,800 m^2/g, 약 600 m^2/g 내지 약 2,200 m^2/g, 약 600 m^2/g 내지 약 2,600 m^2/g, 약 600 m^2/g 내지 약 3,000 m^2/g, 약 750 m^2/g 내지 약 900 m^2/g, 약 750 m^2/g 내지 약 1,050 m^2/g, 약 750 m^2/g 내지 약 1,200 m^2/g, 약 750 m^2/g 내지 약 1,800 m^2/g, 약 750 m^2/g 내지 약 2,200 m^2/g, 약 750 m^2/g 내지 약 2,600 m^2/g, 약 750 m^2/g 내지 약 3,000 m^2/g, 약 900 m^2/g 내지 약 1,050 m^2/g, 약 900 m^2/g 내지 약 1,200 m^2/g, 약 900 m^2/g 내지 약 1,800 m^2/g, 약 900 m^2/g 내지 약 2,200 m^2/g, 약 900 m^2/g 내지 약 2,600 m^2/g, 약 900 m^2/g 내지 약 3,000 m^2/g, 약 1,050 m^2/g 내지 약 1,200 m^2/g, 약 1,050 m^2/g 내지 약 1,800 m^2/g, 약 1,050 m^2/g 내지 약 2,200 m^2/g, 약 1,050 m^2/g 내지 약 2,600 m^2/g, 약 1,050 m^2/g 내지 약 3,000 m^2/g, 약 1,200 m^2/g 내지 약 1,800 m^2/g, 약 1,200 m^2/g 내지 약 2,200 m^2/g, 약 1,200 m^2/g 내지 약 2,600 m^2/g, 약 1,200 m^2/g 내지 약 3,000 m^2/g, 약 1,800 m^2/g 내지 약 2,200 m^2/g, 약 1,800 m^2/g 내지 약 2,600

m^2/g, 약 1,800 m^2/g 내지 약 3,000 m^2/g, 약 2,200 m^2/g 내지 약 2,600 m^2/g, 약 2,200 m^2/g 내지 약 3,000 m^2/g, 또는 약 2,600 m^2/g 내지 약 3,000 m^2/g의 비표면적을 갖는다.

[0010] 일부 실시양태에서, 전극은 약 30% 내지 약 99%의 로딩 비 (loading ratio)를 갖는다. 일부 실시양태에서, 전극은 적어도 약 30%의 로딩 비를 갖는다. 일부 실시양태에서, 전극은 최대 약 99%의 로딩 비를 갖는다. 일부 실시양태에서, 전극은 약 30% 내지 약 40%, 약 30% 내지 약 50%, 약 30% 내지 약 60%, 약 30% 내지 약 70%, 약 30% 내지 약 80%, 약 30% 내지 약 90%, 약 30% 내지 약 99%, 약 40% 내지 약 50%, 약 40% 내지 약 60%, 약 40% 내지 약 70%, 약 40% 내지 약 80%, 약 40% 내지 약 90%, 약 40% 내지 약 99%, 약 50% 내지 약 60%, 약 50% 내지 약 70%, 약 50% 내지 약 80%, 약 50% 내지 약 90%, 약 50% 내지 약 99%, 약 60% 내지 약 70%, 약 60% 내지 약 80%, 약 60% 내지 약 90%, 약 60% 내지 약 99%, 약 70% 내지 약 80%, 약 70% 내지 약 90%, 약 70% 내지 약 99%, 약 80% 내지 약 90%, 약 80% 내지 약 99%, 또는 약 90% 내지 약 99%의 로딩 비를 갖는다.

[0011] 일부 실시양태에서, 전극은 약 500 사이클 내지 약 2,000,000 사이클의 사이클 수명을 갖는다. 일부 실시양태에서, 전극은 적어도 약 500 사이클의 사이클 수명을 갖는다. 일부 실시양태에서, 전극은 최대 약 2,000,000 사이클의 사이클 수명을 갖는다. 일부 실시양태에서, 전극은 약 500 사이클 내지 약 1,000 사이클, 약 500 사이클 내지 약 5,000 사이클, 약 500 사이클 내지 약 10,000 사이클, 약 500 사이클 내지 약 50,000 사이클, 약 500 사이클 내지 약 100,000 사이클, 약 500 사이클 내지 약 500,000 사이클, 약 500 사이클 내지 약 1,000,000 사이클, 약 500 사이클 내지 약 2,000,000 사이클, 약 1,000 사이클 내지 약 5,000 사이클, 약 1,000 사이클 내지 약 10,000 사이클, 약 1,000 사이클 내지 약 50,000 사이클, 약 1,000 사이클 내지 약 100,000 사이클, 약 1,000 사이클 내지 약 500,000 사이클, 약 1,000 사이클 내지 약 1,000,000 사이클, 약 1,000 사이클 내지 약 2,000,000 사이클, 약 5,000 사이클 내지 약 10,000 사이클, 약 5,000 사이클 내지 약 50,000 사이클, 약 5,000 사이클 내지 약 100,000 사이클, 약 5,000 사이클 내지 약 500,000 사이클, 약 5,000 사이클 내지 약 1,000,000 사이클, 약 5,000 사이클 내지 약 2,000,000 사이클, 약 10,000 사이클 내지 약 50,000 사이클, 약 10,000 사이클 내지 약 100,000 사이클, 약 10,000 사이클 내지 약 500,000 사이클, 약 10,000 사이클 내지 약 1,000,000 사이클, 약 10,000 사이클 내지 약 2,000,000 사이클, 약 50,000 사이클 내지 약 100,000 사이클, 약 50,000 사이클 내지 약 500,000 사이클, 약 50,000 사이클 내지 약 1,000,000 사이클, 약 50,000 사이클 내지 약 2,000,000 사이클, 약 100,000 사이클 내지 약 500,000 사이클, 약 100,000 사이클 내지 약 1,000,000 사이클, 약 100,000 사이클 내지 약 2,000,000 사이클, 약 500,000 사이클 내지 약 1,000,000 사이클, 약 500,000 사이클 내지 약 2,000,000 사이클, 또는 약 1,000,000 사이클 내지 약 2,000,000 사이클의 사이클 수명을 갖는다.

[0012] 일부 실시양태에서, 전극은 약 250 mAh/g 내지 약 2,600 mAh/g의 약 0.1의 C-레이트에서의 비용량을 갖는다. 일부 실시양태에서, 전극은 적어도 약 250 mAh/g의 약 0.1의 C-레이트에서의 비용량을 갖는다. 일부 실시양태에서, 전극은 최대 약 4,000 mAh/g의 약 0.1의 C-레이트에서의 비용량을 갖는다. 일부 실시양태에서, 전극은 약 250 mAh/g 내지 약 500 mAh/g, 약 250 mAh/g 내지 약 750 mAh/g, 약 250 mAh/g 내지 약 1,000 mAh/g, 약 250 mAh/g 내지 약 2,000 mAh/g, 약 250 mAh/g 내지 약 3,000 mAh/g, 약 250 mAh/g 내지 약 4,000 mAh/g, 약 500 mAh/g 내지 약 750 mAh/g, 약 500 mAh/g 내지 약 1,000 mAh/g, 약 500 mAh/g 내지 약 2,000 mAh/g, 약 500 mAh/g 내지 약 3,000 mAh/g, 약 500 mAh/g 내지 약 4,000 mAh/g, 약 750 mAh/g 내지 약 1,000 mAh/g, 약 750 mAh/g 내지 약 2,000 mAh/g, 약 750 mAh/g 내지 약 3,000 mAh/g, 약 750 mAh/g 내지 약 4,000 mAh/g, 약 1,000 mAh/g 내지 약 2,000 mAh/g, 약 1,000 mAh/g 내지 약 3,000 mAh/g, 약 1,000 mAh/g 내지 약 4,000 mAh/g, 약 2,000 mAh/g 내지 약 3,000 mAh/g, 약 2,000 mAh/g 내지 약 4,000 mAh/g, 또는 약 3,000 mAh/g 내지 약 4,000 mAh/g의 약 0.1의 C-레이트에서의 비용량을 갖는다.

[0013] 일부 실시양태에서, 전극은 약 90% 내지 약 99%의 다공성을 갖는다. 일부 실시양태에서, 전극은 적어도 약 90%의 다공성을 갖는다. 일부 실시양태에서, 전극은 최대 약 99%의 다공성을 갖는다. 일부 실시양태에서, 전극은 약 90% 내지 약 92%, 약 90% 내지 약 94%, 약 90% 내지 약 96%, 약 90% 내지 약 98%, 약 90% 내지 약 99%, 약 92% 내지 약 94%, 약 92% 내지 약 96%, 약 92% 내지 약 98%, 약 92% 내지 약 99%, 약 94% 내지 약 96%, 약 94% 내지 약 98%, 약 94% 내지 약 99%, 약 96% 내지 약 98%, 약 96% 내지 약 99%, 또는 약 98% 내지 약 99%의 다공성을 갖는다.

[0014] 일부 실시양태에서, 전극은 약 0.002 μm 내지 약 100,000 μm의 세공 직경을 갖는다. 일부 실시양태에서, 전극은 적어도 약 0.002 μm의 세공 직경을 갖는다. 일부 실시양태에서, 전극은 최대 약 100,000 μm의 세공 직경을 갖는다. 일부 실시양태에서, 전극은 최대 약 100 μm의 세공 직경을 갖는다. 일부 실시양태에서, 전극은

약 0.002 μm 내지 약 0.01 μm, 약 0.002 μm 내지 약 0.1 μm, 약 0.002 μm 내지 약 1 μm, 약 0.002 μm 내지 약 10 μm, 약 0.002 μm 내지 약 100 μm, 약 0.002 μm 내지 약 1,000 μm, 약 0.002 μm 내지 약 10,000 μm, 약 0.002 μm 내지 약 100,000 μm, 약 0.01 μm 내지 약 0.1 μm, 약 0.01 μm 내지 약 1 μm, 약 0.01 μm 내지 약 10 μm, 약 0.01 μm 내지 약 100 μm, 약 0.01 μm 내지 약 1,000 μm, 약 0.01 μm 내지 약 10,000 μm, 약 0.01 μm 내지 약 100,000 μm, 약 0.1 μm 내지 약 1 μm, 약 0.1 μm 내지 약 10 μm, 약 0.1 μm 내지 약 100 μm, 약 0.1 μm 내지 약 1,000 μm, 약 0.1 μm 내지 약 10,000 μm, 약 0.1 μm 내지 약 100,000 μm, 약 1 μm 내지 약 10 μm, 약 1 μm 내지 약 100 μm, 약 1 μm 내지 약 1,000 μm, 약 1 μm 내지 약 10,000 μm, 약 1 μm 내지 약 100,000 μm, 약 10 μm 내지 약 100 μm, 약 10 μm 내지 약 1,000 μm, 약 10 μm 내지 약 10,000 μm, 약 10 μm 내지 약 100,000 μm, 약 100 μm 내지 약 1,000 μm, 약 100 μm 내지 약 10,000 μm, 약 100 μm 내지 약 100,000 μm, 약 1,000 μm 내지 약 10,000 μm, 약 1,000 μm 내지 약 100,000 μm, 약 10,000 μm 내지 약 100,000 μm, 약 0.002 μm 내지 약 0.005 μm, 약 0.002 μm 내지 약 0.02 μm, 약 0.002 μm 내지 약 0.05 μm, 약 0.002 μm 내지 약 0.2 μm, 약 0.002 μm 내지 약 0.5 μm, 약 0.002 μm 내지 약 2 μm, 약 0.002 μm 내지 약 5 μm, 약 0.002 μm 내지 약 20 μm, 약 0.002 μm 내지 약 50 μm, 약 0.002 μm 내지 약 100 μm, 약 0.005 μm 내지 약 0.02 μm, 약 0.005 μm 내지 약 0.05 μm, 약 0.005 μm 내지 약 0.2 μm, 약 0.005 μm 내지 약 0.5 μm, 약 0.005 μm 내지 약 2 μm, 약 0.005 μm 내지 약 5 μm, 약 0.005 μm 내지 약 20 μm, 약 0.005 μm 내지 약 50 μm, 약 0.005 μm 내지 약 100 μm, 약 0.02 μm 내지 약 0.05 μm, 약 0.02 μm 내지 약 0.2 μm, 약 0.02 μm 내지 약 0.5 μm, 약 0.02 μm 내지 약 2 μm, 약 0.02 μm 내지 약 5 μm, 약 0.02 μm 내지 약 20 μm, 약 0.02 μm 내지 약 50 μm, 약 0.02 μm 내지 약 100 μm, 약 0.05 μm 내지 약 0.2 μm, 약 0.05 μm 내지 약 0.5 μm, 약 0.05 μm 내지 약 2 μm, 약 0.05 μm 내지 약 5 μm, 약 0.05 μm 내지 약 20 μm, 약 0.05 μm 내지 약 50 μm, 약 0.05 μm 내지 약 100 μm, 약 0.2 μm 내지 약 0.5 μm, 약 0.2 μm 내지 약 2 μm, 약 0.2 μm 내지 약 5 μm, 약 0.2 μm 내지 약 20 μm, 약 0.2 μm 내지 약 50 μm, 약 0.2 μm 내지 약 100 μm, 약 0.5 μm 내지 약 2 μm, 약 0.5 μm 내지 약 5 μm, 약 0.5 μm 내지 약 20 μm, 약 0.5 μm 내지 약 50 μm, 약 0.5 μm 내지 약 100 μm, 약 2 μm 내지 약 5 μm, 약 2 μm 내지 약 20 μm, 약 2 μm 내지 약 50 μm, 약 2 μm 내지 약 100 μm, 약 5 μm 내지 약 20 μm, 약 5 μm 내지 약 50 μm, 약 5 μm 내지 약 100 μm, 약 20 μm 내지 약 50 μm, 약 20 μm 내지 약 100 μm, 또는 약 50 μm 내지 약 100 μm의 세공 직경을 갖는다.

[0015] 일부 실시양태에서, 전극은 결합제를 포함하지 않는다. 일부 실시양태에서, 전극은 전도성 첨가제를 포함하지 않는다. 일부 실시양태에서, 전극은 전도성 첨가제 또는 결합제를 포함하지 않는다.

[0016] 일부 실시양태에서, 전극은 자립형이다.

[0017] 전극이 다공성 구조를 갖는 그래핀 시트의 상호연결된 전도성 네트워크를 포함하는 3D 그래핀 프레임워크를 포함하는 일부 실시양태에서, 전극은 최대 약 280 μm의 두께를 갖는다. 전극이 다공성 구조를 갖는 그래핀 시트의 상호연결된 전도성 네트워크를 포함하는 3D 그래핀 프레임워크를 포함하는 일부 실시양태에서, 전극은 약 70 μm 내지 약 280 μm의 두께를 갖는다. 전극이 다공성 구조를 갖는 그래핀 시트의 상호연결된 전도성 네트워크를 포함하는 3D 그래핀 프레임워크를 포함하는 일부 실시양태에서, 전극은 적어도 약 70 μm의 두께를 갖는다. 전극이 다공성 구조를 갖는 그래핀 시트의 상호연결된 전도성 네트워크를 포함하는 3D 그래핀 프레임워크를 포함하는 일부 실시양태에서, 전극은 약 70 μm 내지 약 100 μm, 약 70 μm 내지 약 130 μm, 약 70 μm 내지 약 160 μm, 약 70 μm 내지 약 190 μm, 약 70 μm 내지 약 220 μm, 약 70 μm 내지 약 250 μm, 약 70 μm 내지 약 280 μm, 약 100 μm 내지 약 130 μm, 약 100 μm 내지 약 160 μm, 약 100 μm 내지 약 190 μm, 약 100 μm 내지 약 220 μm, 약 100 μm 내지 약 250 μm, 약 100 μm 내지 약 280 μm, 약 130 μm 내지 약 160 μm, 약 130 μm 내지 약 190 μm, 약 130 μm 내지 약 220 μm, 약 130 μm 내지 약 250 μm, 약 130 μm 내지 약 280 μm, 약 160 μm 내지 약 190 μm, 약 160 μm 내지 약 220 μm, 약 160 μm 내지 약 250 μm, 약 160 μm 내지 약 280 μm, 약 190 μm 내지 약 220 μm, 약 190 μm 내지 약 250 μm, 약 190 μm 내지 약 280 μm, 약 220 μm 내지 약 250 μm, 약 220 μm 내지 약 280 μm 또는 약 250 μm 내지 약 280 μm의 두께를 갖는다.

[0018] 전극이 다공성 구조를 갖는 그래핀 시트의 상호연결된 전도성 네트워크를 포함하는 3D 그래핀 프레임워크를 포함하는 일부 실시양태에서, 전극은 약 1 mg/cm^2 내지 약 15 mg/cm^{2}의 면적 로딩 질량을 갖는다. 전극이 다공성 구조를 갖는 그래핀 시트의 상호연결된 전도성 네트워크를 포함하는 3D 그래핀 프레임워크를 포함하는 일부 실시양태에서, 전극은 적어도 약 1 mg/cm^{2}의 면적 로딩 질량을 갖는다. 전극이 다공성 구조를 갖는 그래핀 시트

의 상호연결된 전도성 네트워크를 포함하는 3D 그래핀 프레임워크를 포함하는 일부 실시양태에서, 전극은 최대 약 15 mg/cm^{2}의 면적 로딩 질량을 갖는다. 전극이 다공성 구조를 갖는 그래핀 시트의 상호연결된 전도성 네트워크를 포함하는 3D 그래핀 프레임워크를 포함하는 일부 실시양태에서, 전극은 약 1 mg/cm^2 내지 약 2 mg/cm^2, 약 1 mg/cm^2 내지 약 3 mg/cm^2, 약 1 mg/cm^2 내지 약 5 mg/cm^2, 약 1 mg/cm^2 내지 약 8 mg/cm^2, 약 1 mg/cm^2 내지 약 12 mg/cm^2, 약 1 mg/cm^2 내지 약 15 mg/cm^2, 약 2 mg/cm^2 내지 약 3 mg/cm^2, 약 2 mg/cm^2 내지 약 5 mg/cm^2, 약 2 mg/cm^2 내지 약 8 mg/cm^2, 약 2 mg/cm^2 내지 약 12 mg/cm^2, 약 2 mg/cm^2 내지 약 15 mg/cm^2, 약 3 mg/cm^2 내지 약 5 mg/cm^2, 약 3 mg/cm^2 내지 약 8 mg/cm^2, 약 3 mg/cm^2 내지 약 12 mg/cm^2, 약 3 mg/cm^2 내지 약 15 mg/cm^2, 약 5 mg/cm^2 내지 약 8 mg/cm^2, 약 5 mg/cm^2 내지 약 12 mg/cm^2, 약 5 mg/cm^2 내지 약 15 mg/cm^2, 약 8 mg/cm^2 내지 약 12 mg/cm^2, 약 8 mg/cm^2 내지 약 15 mg/cm^2, 또는 약 12 mg/cm^2 내지 약 15 mg/cm^{2}의 면적 로딩 질량을 갖는다.

[0019] 전극이 다공성 구조를 갖는 그래핀 시트의 상호연결된 전도성 네트워크를 포함하는 3D 그래핀 프레임워크를 포함하는 일부 실시양태에서, 전극은 약 500 m^2/g 내지 약 3,000 m^2/g의 비표면적을 갖는다. 전극이 다공성 구조를 갖는 그래핀 시트의 상호연결된 전도성 네트워크를 포함하는 3D 그래핀 프레임워크를 포함하는 일부 실시양태에서, 전극은 적어도 약 500 m^2/g의 비표면적을 갖는다. 전극이 다공성 구조를 갖는 그래핀 시트의 상호연결된 전도성 네트워크를 포함하는 3D 그래핀 프레임워크를 포함하는 일부 실시양태에서, 전극은 최대 약 3,000 m^2/g의 비표면적을 갖는다. 전극이 다공성 구조를 갖는 그래핀 시트의 상호연결된 전도성 네트워크를 포함하는 3D 그래핀 프레임워크를 포함하는 일부 실시양태에서, 전극은 비표면적 약 500 m^2/g 내지 약 750 m^2/g, 약 500 m^2/g 내지 약 1,000 m^2/g, 약 500 m^2/g 내지 약 1,500 m^2/g, 약 500 m^2/g 내지 약 2,000 m^2/g, 약 500 m^2/g 내지 약 2,500 m^2/g, 약 500 m^2/g 내지 약 3,000 m^2/g, 약 750 m^2/g 내지 약 1,000 m^2/g, 약 750 m^2/g 내지 약 1,500 m^2/g, 약 750 m^2/g 내지 약 2,000 m^2/g, 약 750 m^2/g 내지 약 2,500 m^2/g, 약 750 m^2/g 내지 약 3,000 m^2/g, 약 1,000 m^2/g 내지 약 1,500 m^2/g, 약 1,000 m^2/g 내지 약 2,000 m^2/g, 약 1,000 m^2/g 내지 약 2,500 m^2/g, 약 1,000 m^2/g 내지 약 3,000 m^2/g, 약 1,500 m^2/g 내지 약 2,000 m^2/g, 약 1,500 m^2/g 내지 약 2,500 m^2/g, 약 1,500 m^2/g 내지 약 3,000 m^2/g, 약 2,000 m^2/g 내지 약 2,500 m^2/g, 약 2,000 m^2/g 내지 약 3,000 m^2/g, 또는 약 2,500 m^2/g 내지 약 3,000 m^2/g을 갖는다.

[0020] 전극이 다공성 구조를 갖는 그래핀 시트의 상호연결된 전도성 네트워크를 포함하는 3D 그래핀 프레임워크를 포함하는 일부 실시양태에서, 전극은 약 90% 내지 약 99%의 다공성을 갖는다. 전극이 다공성 구조를 갖는 그래핀 시트의 상호연결된 전도성 네트워크를 포함하는 3D 그래핀 프레임워크를 포함하는 일부 실시양태에서, 전극은 적어도 약 90%의 다공성을 갖는다. 전극이 다공성 구조를 갖는 그래핀 시트의의 상호연결된 전도성 네트워크를 포함하는 3D 그래핀 프레임워크를 포함하는 일부 실시양태에서, 전극은 최대 약 99%의 다공성을 갖는다. 전극이 다공성 구조를 갖는 그래핀 시트의 상호연결된 전도성 네트워크를 포함하는 3D 그래핀 프레임워크를 포함하는 일부 실시양태에서, 전극은 약 90% 내지 약 92%, 약 90% 내지 약 94%, 약 90% 내지 약 96%, 약 90% 내지 약 98%, 약 90% 내지 약 99%, 약 92% 내지 약 94%, 약 92% 내지 약 96%, 약 92% 내지 약 98%, 약 92% 내지 약 99%, 약 94% 내지 약 96%, 약 94% 내지 약 98%, 약 94% 내지 약 99%, 약 96% 내지 약 98%, 약 96% 내지 약 99%, 또는 약 98% 내지 약 99%의 다공성을 갖는다.

[0021] 전극이 다공성 구조를 갖는 그래핀 시트의 상호연결된 전도성 네트워크를 포함하는 3D 그래핀 프레임워크를 포함하는 일부 실시양태에서, 전극은 약 500 S/m 내지 약 2,000 S/m의 전도성을 갖는다. 전극이 다공성 구조를 갖는 그래핀 시트의 상호연결된 전도성 네트워크를 포함하는 3D 그래핀 프레임워크를 포함하는 일부 실시양태에서, 전극은 적어도 약 500 S/m의 전도성을 갖는다. 전극이 다공성 구조를 갖는 그래핀 시트의 상호연결된 전도성 네트워크를 포함하는 3D 그래핀 프레임워크를 포함하는 일부 실시양태에서, 전극은 최대 약 2,000 S/m의 전도성을 갖는다. 전극이 다공성 구조를 갖는 그래핀 시트의 상호연결된 전도성 네트워크를 포함하는 3D 그래핀 프레임워크를 포함하는 일부 실시양태에서, 전극은 약 500 S/m 내지 약 750 S/m, 약 500 S/m 내지 약 1,000 S/m, 약 500 S/m 내지 약 1,250 S/m, 약 500 S/m 내지 약 1,500 S/m, 약 500 S/m 내지 약 1,750 S/m, 약 500 S/m 내지 약 2,000 S/m, 약 750 S/m 내지 약 1,000 S/m, 약 750 S/m 내지 약 1,250 S/m, 약 750 S/m 내지 약

1,500 S/m, 약 750 S/m 내지 약 1,750 S/m, 약 750 S/m 내지 약 2,000 S/m, 약 1,000 S/m 내지 약 1,250 S/m, 약 1,000 S/m 내지 약 1,500 S/m, 약 1,000 S/m 내지 약 1,750 S/m, 약 1,000 S/m 내지 약 2,000 S/m, 약 1,250 S/m 내지 약 1,500 S/m, 약 1,250 S/m 내지 약 1,750 S/m, 약 1,250 S/m 내지 약 2,000 S/m, 약 1,500 S/m 내지 약 1,750 S/m, 약 1,500 S/m 내지 약 2,000 S/m, 또는 약 1,750 S/m 내지 약 2,000 S/m의 전도성을 갖는다.

[0022] 전극이 다공성 구조를 갖는 그래핀 시트의 상호연결된 전도성 네트워크를 포함하는 3D 그래핀 프레임워크를 포함하는 일부 실시양태에서, 전극은 약 125 F/g 내지 약 800 F/g의 전극-비 중량측정 정전용량 (electrode-specific gravimetric capacitance)을 갖는다. 전극이 다공성 구조를 갖는 그래핀 시트의 상호연결된 전도성 네트워크를 포함하는 3D 그래핀 프레임워크를 포함하는 일부 실시양태에서, 전극은 적어도 약 125 F/g의 전극-비 중량측정 정전용량을 갖는다. 전극이 다공성 구조를 갖는 그래핀 시트의 상호연결된 전도성 네트워크를 포함하는 3D 그래핀 프레임워크를 포함하는 일부 실시양태에서, 전극은 최대 약 800 F/g의 전극-비 중량측정 정전용량을 갖는다. 전극이 다공성 구조를 갖는 그래핀 시트의 상호연결된 전도성 네트워크를 포함하는 3D 그래핀 프레임워크를 포함하는 일부 실시양태에서, 전극은 약 125 F/g 내지 약 200 F/g, 약 125 F/g 내지 약 300 F/g, 약 125 F/g 내지 약 400 F/g, 약 125 F/g 내지 약 500 F/g, 약 125 F/g 내지 약 600 F/g, 약 125 F/g 내지 약 700 F/g, 약 125 F/g 내지 약 800 F/g, 약 200 F/g 내지 약 300 F/g, 약 200 F/g 내지 약 400 F/g, 약 200 F/g 내지 약 500 F/g, 약 200 F/g 내지 약 600 F/g, 약 200 F/g 내지 약 700 F/g, 약 200 F/g 내지 약 800 F/g, 약 300 F/g 내지 약 400 F/g, 약 300 F/g 내지 약 500 F/g, 약 300 F/g 내지 약 600 F/g, 약 300 F/g 내지 약 700 F/g, 약 300 F/g 내지 약 800 F/g, 약 400 F/g 내지 약 500 F/g, 약 400 F/g 내지 약 600 F/g, 약 400 F/g 내지 약 700 F/g, 약 400 F/g 내지 약 800 F/g, 약 500 F/g 내지 약 600 F/g, 약 500 F/g 내지 약 700 F/g, 약 500 F/g 내지 약 800 F/g, 약 600 F/g 내지 약 700 F/g, 약 600 F/g 내지 약 800 F/g, 또는 약 700 F/g 내지 약 800 F/g의 전극-비 중량측정 정전용량을 갖는다.

[0023] 일부 실시양태에서, 전극은 복합 전극이며, 여기서 복합 재료는 용량성 또는 슈도-용량성 물질을 포함한다. 일부 실시양태에서, 용량성 또는 슈도-용량성 물질은 규소, 황, Nb_2O_5, Al_2O_3, V_2O_5, Re_2O_7, CrO_3, CeO_2, RuO_2, ZrO_2, MoO_3, WO_3, TiO_2, 또는 그의 임의의 조합을 포함한다.

[0024] 일부 실시양태에서, 전극은 복합 전극이며, 여기서 복합 재료는 규소를 포함한다.

[0025] 전극이 복합 전극이고, 복합 재료가 규소를 포함하는 일부 실시양태에서, 전극은 약 450 m^2/g 내지 약 1,800 m^2/g의 비표면적을 갖는다. 전극이 복합 전극이고, 복합 재료가 규소를 포함하는 일부 실시양태에서, 전극은 적어도 약 450 m^2/g의 비표면적을 갖는다. 전극이 복합 전극이고, 복합 재료가 규소를 포함하는 일부 실시양태에서, 전극은 최대 약 1,800 m^2/g의 비표면적을 갖는다. 전극이 복합 전극이고, 복합 재료가 규소를 포함하는 일부 실시양태에서, 전극은 비표면적 약 450 m^2/g 내지 약 750 m^2/g, 약 450 m^2/g 내지 약 1,000 m^2/g, 약 450 m^2/g 내지 약 1,500 m^2/g, 약 450 m^2/g 내지 약 2,000 m^2/g, 약 450 m^2/g 내지 약 2,500 m^2/g, 약 450 m^2/g 내지 약 3,000 m^2/g, 약 750 m^2/g 내지 약 1,000 m^2/g, 약 750 m^2/g 내지 약 1,500 m^2/g, 약 750 m^2/g 내지 약 2,000 m^2/g, 약 750 m^2/g 내지 약 2,500 m^2/g, 약 750 m^2/g 내지 약 3,000 m^2/g, 약 1,000 m^2/g 내지 약 1,500 m^2/g, 약 1,000 m^2/g 내지 약 2,000 m^2/g, 약 1,000 m^2/g 내지 약 2,500 m^2/g, 약 1,000 m^2/g 내지 약 3,000 m^2/g, 또는 약 1,500 m^2/g 내지 약 1,800 m^2/g을 갖는다.

[0026] 전극이 복합 전극이고, 복합 재료가 규소를 포함하는 일부 실시양태에서, 전극은 약 35% 내지 약 95%의 로딩 비를 갖는다. 전극이 복합 전극이고, 복합 재료가 규소를 포함하는 일부 실시양태에서, 전극은 적어도 약 35%의 로딩 비를 갖는다. 전극이 복합 전극이고, 복합 재료가 규소를 포함하는 일부 실시양태에서, 전극은 최대 약 95%의 로딩 비를 갖는다. 전극이 복합 전극이고, 복합 재료가 규소를 포함하는 일부 실시양태에서, 전극은 약 35% 내지 약 40%, 약 35% 내지 약 45%, 약 35% 내지 약 50%, 약 35% 내지 약 55%, 약 35% 내지 약 60%, 약 35% 내지 약 65%, 약 35% 내지 약 70%, 약 35% 내지 약 85%, 약 35% 내지 약 90%, 약 35% 내지 약 95%, 약 40% 내지 약 45%, 약 40% 내지 약 50%, 약 40% 내지 약 55%, 약 40% 내지 약 60%, 약 40% 내지 약 65%, 약 40% 내지 약 70%, 약 40% 내지 약 85%, 약 40% 내지 약 90%, 약 40% 내지 약 95%, 약 45% 내지 약 50%, 약 45% 내지 약 55%, 약 45% 내지 약 60%, 약 45% 내지 약 65%, 약 45% 내지 약 70%, 약 45% 내지 약 85%, 약 45% 내지 약 90%, 약 45% 내지 약 95%, 약 50% 내지 약 55%, 약 50% 내지 약 60%, 약 50% 내지 약 65%, 약 50% 내지 약

70%, 약 50% 내지 약 85%, 약 50% 내지 약 90%, 약 50% 내지 약 95%, 약 55% 내지 약 60%, 약 55% 내지 약 65%, 약 55% 내지 약 70%, 약 55% 내지 약 85%, 약 55% 내지 약 90%, 약 55% 내지 약 95%, 약 60% 내지 약 65%, 약 60% 내지 약 70%, 약 60% 내지 약 85%, 약 60% 내지 약 90%, 약 60% 내지 약 95%, 약 65% 내지 약 70%, 약 65% 내지 약 85%, 약 65% 내지 약 90%, 약 65% 내지 약 95%, 약 70% 내지 약 85%, 약 70% 내지 약 90%, 약 70% 내지 약 95%, 약 85% 내지 약 90%, 약 85% 내지 약 95%, 또는 약 90% 내지 약 95%의 로딩 비를 갖는다.

[0027] 전극이 복합 전극이고, 복합 재료가 규소를 포함하는 일부 실시양태에서, 전극은 약 700 S/m 내지 약 2,800 S/m의 전도성을 갖는다. 전극이 복합 전극이고, 복합 재료가 규소를 포함하는 일부 실시양태에서, 전극은 적어도 약 700 S/m의 전도성을 갖는다. 전극이 복합 전극이고, 복합 재료가 규소를 포함하는 일부 실시양태에서, 전극은 최대 약 2,800 S/m의 전도성을 갖는다. 전극이 복합 전극이고, 복합 재료가 규소를 포함하는 일부 실시양태에서, 전극은 약 700 S/m 내지 약 800 S/m, 약 700 S/m 내지 약 1,000 S/m, 약 700 S/m 내지 약 1,200 S/m, 약 700 S/m 내지 약 1,400 S/m, 약 700 S/m 내지 약 1,800 S/m, 약 700 S/m 내지 약 2,200 S/m, 약 700 S/m 내지 약 2,800 S/m, 약 800 S/m 내지 약 1,000 S/m, 약 800 S/m 내지 약 1,200 S/m, 약 800 S/m 내지 약 1,400 S/m, 약 800 S/m 내지 약 1,800 S/m, 약 800 S/m 내지 약 2,200 S/m, 약 800 S/m 내지 약 2,800 S/m, 약 1,000 S/m 내지 약 1,200 S/m, 약 1,000 S/m 내지 약 1,400 S/m, 약 1,000 S/m 내지 약 1,800 S/m, 약 1,000 S/m 내지 약 2,200 S/m, 약 1,000 S/m 내지 약 2,800 S/m, 약 1,200 S/m 내지 약 1,400 S/m, 약 1,200 S/m 내지 약 1,800 S/m, 약 1,200 S/m 내지 약 2,200 S/m, 약 1,200 S/m 내지 약 2,800 S/m, 약 1,400 S/m 내지 약 1,800 S/m, 약 1,400 S/m 내지 약 2,200 S/m, 약 1,400 S/m 내지 약 2,800 S/m, 약 1,800 S/m 내지 약 2,200 S/m, 약 1,800 S/m 내지 약 2,800 S/m, 또는 약 2,200 S/m 내지 약 2,800 S/m의 전도성을 갖는다.

[0028] 전극이 복합 전극이고, 복합 재료가 규소를 포함하는 일부 실시양태에서, 전극은 약 0.25 V 내지 약 1 V의 작동 전압 전위를 갖는다. 전극이 복합 전극이고, 복합 재료가 규소를 포함하는 일부 실시양태에서, 전극은 적어도 약 0.25 V의 작동 전압 전위를 갖는다. 전극이 복합 전극이고, 복합 재료가 규소를 포함하는 일부 실시양태에서, 전극은 최대 약 1 V의 작동 전압 전위를 갖는다. 전극이 복합 전극이고, 복합 재료가 규소를 포함하는 일부 실시양태에서, 전극은 약 0.25 V 내지 약 0.375 V, 약 0.25 V 내지 약 0.5 V, 약 0.25 V 내지 약 0.625 V, 약 0.25 V 내지 약 1 V, 약 0.375 V 내지 약 0.5 V, 약 0.375 V 내지 약 0.625 V, 약 0.375 V 내지 약 1 V, 약 0.5 V 내지 약 0.625 V, 약 0.5 V 내지 약 1 V, 또는 약 0.625 V 내지 약 1 V의 작동 전압 전위를 갖는다.

[0029] 전극이 복합 전극이고, 복합 재료가 규소를 포함하는 일부 실시양태에서, 전극은 약 250 mAh/g 내지 약 4,000 mAh/g의 0.1 C에서의 비용량을 갖는다. 전극이 복합 전극이고, 복합 재료가 규소를 포함하는 일부 실시양태에서, 전극은 적어도 약 250 mAh/g의 0.1 C에서의 비용량을 갖는다. 전극이 복합 전극이고, 복합 재료가 규소를 포함하는 일부 실시양태에서, 전극은 최대 약 4,000 mAh/g의 0.1 C에서의 비용량을 갖는다. 전극이 복합 전극이고, 복합 재료가 규소를 포함하는 일부 실시양태에서, 전극은 약 250 mAh/g 내지 약 500 mAh/g, 약 250 mAh/g 내지 약 1,000 mAh/g, 약 250 mAh/g 내지 약 1,500 mAh/g, 약 250 mAh/g 내지 약 2,000 mAh/g, 약 250 mAh/g 내지 약 2,500 mAh/g, 약 250 mAh/g 내지 약 3,000 mAh/g, 약 250 mAh/g 내지 약 3,500 mAh/g, 약 250 mAh/g 내지 약 4,000 mAh/g, 약 500 mAh/g 내지 약 1,000 mAh/g, 약 500 mAh/g 내지 약 1,500 mAh/g, 약 500 mAh/g 내지 약 2,000 mAh/g, 약 500 mAh/g 내지 약 2,500 mAh/g, 약 500 mAh/g 내지 약 3,000 mAh/g, 약 500 mAh/g 내지 약 3,500 mAh/g, 약 500 mAh/g 내지 약 4,000 mAh/g, 약 1,000 mAh/g 내지 약 1,500 mAh/g, 약 1,000 mAh/g 내지 약 2,000 mAh/g, 약 1,000 mAh/g 내지 약 2,500 mAh/g, 약 1,000 mAh/g 내지 약 3,000 mAh/g, 약 1,000 mAh/g 내지 약 3,500 mAh/g, 약 1,000 mAh/g 내지 약 4,000 mAh/g, 약 1,500 mAh/g 내지 약 2,000 mAh/g, 약 1,500 mAh/g 내지 약 2,500 mAh/g, 약 1,500 mAh/g 내지 약 3,000 mAh/g, 약 1,500 mAh/g 내지 약 3,500 mAh/g, 약 1,500 mAh/g 내지 약 4,000 mAh/g, 약 2,000 mAh/g 내지 약 2,500 mAh/g, 약 2,000 mAh/g 내지 약 3,000 mAh/g, 약 2,000 mAh/g 내지 약 3,500 mAh/g, 약 2,000 mAh/g 내지 약 4,000 mAh/g, 약 2,500 mAh/g 내지 약 3,000 mAh/g, 약 2,500 mAh/g 내지 약 3,500 mAh/g, 약 2,500 mAh/g 내지 약 4,000 mAh/g, 약 3,000 mAh/g 내지 약 3,500 mAh/g, 약 3,000 mAh/g 내지 약 4,000 mAh/g, 또는 약 3,500 mAh/g 내지 약 4,000 mAh/g의 0.1 C에서의 비용량을 갖는다.

[0030] 일부 실시양태에서, 전극은 복합 전극이며, 여기서 복합 재료는 황을 포함한다.

[0031] 전극이 복합 전극이고, 복합 재료가 황을 포함하는 일부 실시양태에서, 전극은 약 2 mg/cm^2 내지 약 9 mg/cm^2의 면적 로딩 질량을 갖는다. 전극이 복합 전극이고, 복합 재료가 황을 포함하는 일부 실시양태에서, 전극은 적어도 약 2 mg/cm^2의 면적 로딩 질량을 갖는다. 전극이 복합 전극이고, 복합 재료가 황을 포함하는 일부 실시양태

에서, 전극은 최대 약 9 mg/cm^{2}의 면적 로딩 질량을 갖는다. 전극이 복합 전극이고, 복합 재료가 황을 포함하는 일부 실시양태에서, 전극은 약 2 mg/cm^2 내지 약 3 mg/cm^2, 약 2 mg/cm^2 내지 약 4 mg/cm^2, 약 2 mg/cm^2 내지 약 5 mg/cm^2, 약 2 mg/cm^2 내지 약 6 mg/cm^2, 약 2 mg/cm^2 내지 약 7 mg/cm^2, 약 2 mg/cm^2 내지 약 8 mg/cm^2, 약 2 mg/cm^2 내지 약 9 mg/cm^2, 약 3 mg/cm^2 내지 약 4 mg/cm^2, 약 3 mg/cm^2 내지 약 5 mg/cm^2, 약 3 mg/cm^2 내지 약 6 mg/cm^2, 약 3 mg/cm^2 내지 약 7 mg/cm^2, 약 3 mg/cm^2 내지 약 8 mg/cm^2, 약 3 mg/cm^2 내지 약 9 mg/cm^2, 약 4 mg/cm^2 내지 약 5 mg/cm^2, 약 4 mg/cm^2 내지 약 6 mg/cm^2, 약 4 mg/cm^2 내지 약 7 mg/cm^2, 약 4 mg/cm^2 내지 약 8 mg/cm^2, 약 4 mg/cm^2 내지 약 9 mg/cm^2, 약 5 mg/cm^2 내지 약 6 mg/cm^2, 약 5 mg/cm^2 내지 약 7 mg/cm^2, 약 5 mg/cm^2 내지 약 8 mg/cm^2, 약 5 mg/cm^2 내지 약 9 mg/cm^2, 약 6 mg/cm^2 내지 약 7 mg/cm^2, 약 6 mg/cm^2 내지 약 8 mg/cm^2, 약 6 mg/cm^2 내지 약 9 mg/cm^2, 약 7 mg/cm^2 내지 약 8 mg/cm^2, 약 7 mg/cm^2 내지 약 9 mg/cm^2, 또는 약 8 mg/cm^2 내지 약 9 mg/cm^{2}의 면적 로딩 질량을 갖는다.

[0032] 전극이 복합 전극이고, 복합 재료가 황을 포함하는 일부 실시양태에서, 전극은 약 450 m^2/g 내지 약 1,800 m^2/g의 비표면적을 갖는다. 전극이 복합 전극이고, 복합 재료가 황을 포함하는 일부 실시양태에서, 전극은 적어도 약 450 m^2/g의 비표면적을 갖는다. 전극이 복합 전극이고, 복합 재료가 황을 포함하는 일부 실시양태에서, 전극은 최대 약 1,800 m^2/g의 비표면적을 갖는다. 전극이 복합 전극이고, 복합 재료가 황을 포함하는 일부 실시양태에서, 전극은 약 450 m^2/g 내지 약 650 m^2/g, 약 450 m^2/g 내지 약 850 m^2/g, 약 450 m^2/g 내지 약 1,050 m^2/g, 약 450 m^2/g 내지 약 1,200 m^2/g, 약 450 m^2/g 내지 약 1,400 m^2/g, 약 450 m^2/g 내지 약 1,600 m^2/g, 약 450 m^2/g 내지 약 1,800 m^2/g, 약 650 m^2/g 내지 약 850 m^2/g, 약 650 m^2/g 내지 약 1,050 m^2/g, 약 650 m^2/g 내지 약 1,200 m^2/g, 약 650 m^2/g 내지 약 1,400 m^2/g, 약 650 m^2/g 내지 약 1,600 m^2/g, 약 650 m^2/g 내지 약 1,800 m^2/g, 약 850 m^2/g 내지 약 1,050 m^2/g, 약 850 m^2/g 내지 약 1,200 m^2/g, 약 850 m^2/g 내지 약 1,400 m^2/g, 약 850 m^2/g 내지 약 1,600 m^2/g, 약 850 m^2/g 내지 약 1,800 m^2/g, 약 1,050 m^2/g 내지 약 1,200 m^2/g, 약 1,050 m^2/g 내지 약 1,400 m^2/g, 약 1,050 m^2/g 내지 약 1,600 m^2/g, 약 1,050 m^2/g 내지 약 1,800 m^2/g, 약 1,200 m^2/g 내지 약 1,400 m^2/g, 약 1,200 m^2/g 내지 약 1,600 m^2/g, 약 1,200 m^2/g 내지 약 1,800 m^2/g, 약 1,400 m^2/g 내지 약 1,600 m^2/g, 약 1,400 m^2/g 내지 약 1,800 m^2/g, 또는 약 1,600 m^2/g 내지 약 1,800 m^2/g의 비표면적을 갖는다.

[0033] 전극이 복합 전극이고, 복합 재료가 황을 포함하는 일부 실시양태에서, 전극은 약 0.01 μm 내지 약 100 μm의 황 입자 크기를 갖는다. 전극이 복합 전극이고, 복합 재료가 황을 포함하는 일부 실시양태에서, 전극은 적어도 약 0.01 μm의 황 입자 크기를 갖는다. 전극이 복합 전극이고, 복합 재료가 황을 포함하는 일부 실시양태에서, 전극은 최대 약 100 μm의 황 입자 크기를 갖는다. 전극이 복합 전극이고, 복합 재료가 황을 포함하는 일부 실시양태에서, 전극은 약 0.01 μm 내지 약 0.05 μm, 약 0.01 μm 내지 약 0.1 μm, 약 0.01 μm 내지 약 0.5 μm, 약 0.01 μm 내지 약 1 μm, 약 0.01 μm 내지 약 5 μm, 약 0.01 μm 내지 약 10 μm, 약 0.01 μm 내지 약 25 μm, 약 0.01 μm 내지 약 50 μm, 약 0.01 μm 내지 약 100 μm, 약 0.05 μm 내지 약 0.1 μm, 약 0.05 μm 내지 약 0.5 μm, 약 0.05 μm 내지 약 1 μm, 약 0.05 μm 내지 약 5 μm, 약 0.05 μm 내지 약 10 μm, 약 0.05 μm 내지 약 25 μm, 약 0.05 μm 내지 약 50 μm, 약 0.05 μm 내지 약 100 μm, 약 0.1 μm 내지 약 0.5 μm, 약 0.1 μm 내지 약 1 μm, 약 0.1 μm 내지 약 5 μm, 약 0.1 μm 내지 약 10 μm, 약 0.1 μm 내지 약 25 μm, 약 0.1 μm 내지 약 50 μm, 약 0.1 μm 내지 약 100 μm, 약 0.5 μm 내지 약 1 μm, 약 0.5 μm 내지 약 5 μm, 약 0.5 μm 내지 약 10 μm, 약 0.5 μm 내지 약 25 μm, 약 0.5 μm 내지 약 50 μm, 약 0.5 μm 내지 약 100 μm, 약 1 μm 내지 약 5 μm, 약 1 μm 내지 약 10 μm, 약 1 μm 내지 약 25 μm, 약 1 μm 내지 약 50 μm, 약 1 μm 내지 약 100 μm, 약 5 μm 내지 약 10 μm, 약 5 μm 내지 약 25 μm, 약 5 μm 내지 약 50 μm, 약 5 μm 내지 약 100 μm, 약 10 μm 내지 약 25 μm, 약 10 μm 내지 약 50 μm, 약 10 μm 내지 약 100 μm, 약 25 μm 내지 약 50 μm, 약 25 μm 내지 약 100 μm, 또는 약 50 μm 내지 약 100 μm의 황 입자 크기를 갖는다.

[0034] 전극이 복합 전극이고, 복합 재료가 황을 포함하는 일부 실시양태에서, 전극은 약 30% 내지 약 99%의 로딩 비를

갖는다. 전극이 복합 전극이고, 복합 재료가 황을 포함하는 일부 실시양태에서, 전극은 적어도 약 30%의 로딩 비를 갖는다. 전극이 복합 전극이고, 복합 재료가 황을 포함하는 일부 실시양태에서, 전극은 최대 약 99%의 로딩 비를 갖는다. 전극이 복합 전극이고, 복합 재료가 황을 포함하는 일부 실시양태에서, 전극은 약 30% 내지 약 40%, 약 30% 내지 약 50%, 약 30% 내지 약 60%, 약 30% 내지 약 70%, 약 30% 내지 약 80%, 약 30% 내지 약 90%, 약 30% 내지 약 99%, 약 40% 내지 약 50%, 약 40% 내지 약 60%, 약 40% 내지 약 70%, 약 40% 내지 약 80%, 약 40% 내지 약 90%, 약 40% 내지 약 99%, 약 50% 내지 약 60%, 약 50% 내지 약 70%, 약 50% 내지 약 80%, 약 50% 내지 약 90%, 약 50% 내지 약 99%, 약 60% 내지 약 70%, 약 60% 내지 약 80%, 약 60% 내지 약 90%, 약 60% 내지 약 99%, 약 70% 내지 약 80%, 약 70% 내지 약 90%, 약 70% 내지 약 99%, 약 80% 내지 약 90%, 약 80% 내지 약 99%, 또는 약 90% 내지 약 99%의 로딩 비를 갖는다.

[0035] 전극이 복합 전극이고, 복합 재료가 황을 포함하는 일부 실시양태에서, 전극은 약 30% 내지 약 95%의 황 로딩 비를 갖는다. 전극이 복합 전극이고, 복합 재료가 황을 포함하는 일부 실시양태에서, 전극은 적어도 약 35%의 황 로딩 비를 갖는다. 전극이 복합 전극이고, 복합 재료가 황을 포함하는 일부 실시양태에서, 전극은 최대 약 95%의 황 로딩 비를 갖는다. 전극이 복합 전극이고, 복합 재료가 황을 포함하는 일부 실시양태에서, 전극은 약 30% 내지 약 40%, 약 30% 내지 약 45%, 약 30% 내지 약 50%, 약 30% 내지 약 55%, 약 30% 내지 약 60%, 약 30% 내지 약 65%, 약 30% 내지 약 70%, 약 30% 내지 약 85%, 약 30% 내지 약 90%, 약 30% 내지 약 95%, 약 40% 내지 약 45%, 약 40% 내지 약 50%, 약 40% 내지 약 55%, 약 40% 내지 약 60%, 약 40% 내지 약 65%, 약 40% 내지 약 70%, 약 40% 내지 약 85%, 약 40% 내지 약 90%, 약 40% 내지 약 95%, 약 45% 내지 약 50%, 약 45% 내지 약 55%, 약 45% 내지 약 60%, 약 45% 내지 약 65%, 약 45% 내지 약 70%, 약 45% 내지 약 85%, 약 45% 내지 약 90%, 약 45% 내지 약 95%, 약 50% 내지 약 55%, 약 50% 내지 약 60%, 약 50% 내지 약 65%, 약 50% 내지 약 70%, 약 50% 내지 약 85%, 약 50% 내지 약 90%, 약 50% 내지 약 95%, 약 55% 내지 약 60%, 약 55% 내지 약 65%, 약 55% 내지 약 70%, 약 55% 내지 약 85%, 약 55% 내지 약 90%, 약 55% 내지 약 95%, 약 60% 내지 약 65%, 약 60% 내지 약 70%, 약 60% 내지 약 85%, 약 60% 내지 약 90%, 약 60% 내지 약 95%, 약 65% 내지 약 70%, 약 65% 내지 약 85%, 약 65% 내지 약 90%, 약 65% 내지 약 95%, 약 70% 내지 약 85%, 약 70% 내지 약 90%, 약 70% 내지 약 95%, 약 85% 내지 약 90%, 약 85% 내지 약 95%, 또는 약 90% 내지 약 95%의 로딩 비를 갖는다.

[0036] 전극이 복합 전극이고, 복합 재료가 황을 포함하는 일부 실시양태에서, 전극은 약 400 mAh/g 내지 약 2,600 mAh/g의 약 0.1의 C-레이트에서의 비용량을 갖는다. 전극이 복합 전극이고, 복합 재료가 황을 포함하는 일부 실시양태에서, 전극은 적어도 약 400 mAh/g의 약 0.1의 C-레이트에서의 비용량을 갖는다. 전극이 복합 전극이고, 복합 재료가 황을 포함하는 일부 실시양태에서, 전극은 최대 약 2,600 mAh/g의 약 0.1의 C-레이트에서의 비용량을 갖는다. 전극이 복합 전극이고, 복합 재료가 황을 포함하는 일부 실시양태에서, 전극은 약 400 mAh/g 내지 약 600 mAh/g, 약 400 mAh/g 내지 약 800 mAh/g, 약 400 mAh/g 내지 약 1,000 mAh/g, 약 400 mAh/g 내지 약 1,400 mAh/g, 약 400 mAh/g 내지 약 1,800 mAh/g, 약 400 mAh/g 내지 약 2,200 mAh/g, 약 400 mAh/g 내지 약 2,600 mAh/g, 약 600 mAh/g 내지 약 800 mAh/g, 약 600 mAh/g 내지 약 1,000 mAh/g, 약 600 mAh/g 내지 약 1,400 mAh/g, 약 600 mAh/g 내지 약 1,800 mAh/g, 약 600 mAh/g 내지 약 2,200 mAh/g, 약 600 mAh/g 내지 약 2,600 mAh/g, 약 800 mAh/g 내지 약 1,000 mAh/g, 약 800 mAh/g 내지 약 1,400 mAh/g, 약 800 mAh/g 내지 약 1,800 mAh/g, 약 800 mAh/g 내지 약 2,200 mAh/g, 약 800 mAh/g 내지 약 2,600 mAh/g, 약 1,000 mAh/g 내지 약 1,400 mAh/g, 약 1,000 mAh/g 내지 약 1,800 mAh/g, 약 1,000 mAh/g 내지 약 2,200 mAh/g, 약 1,000 mAh/g 내지 약 2,600 mAh/g, 약 1,400 mAh/g 내지 약 1,800 mAh/g, 약 1,400 mAh/g 내지 약 2,200 mAh/g, 약 1,400 mAh/g 내지 약 2,600 mAh/g, 약 1,800 mAh/g 내지 약 2,200 mAh/g, 약 1,800 mAh/g 내지 약 2,600 mAh/g, 또는 약 2,200 mAh/g 내지 약 2,600 mAh/g의 약 0.1의 C-레이트에서의 비용량을 갖는다.

[0037] 전극이 복합 전극이고, 복합 재료가 황을 포함하고, 전극이 약 70 중량% 황으로 구성되는 일부 실시양태에서, 전극은 약 640 mAh/g 내지 약 2,600 mAh/g의 약 0.1의 C-레이트에서의 황-비용량을 갖는다. 전극이 복합 전극이고, 복합 재료가 황을 포함하고, 전극이 약 70 중량% 황으로 구성되는 일부 실시양태에서, 전극은 적어도 약 640 mAh/g의 약 0.1의 C-레이트에서의 황-비용량을 갖는다. 이들 실시양태에서, 전극은 최대 약 2,600 mAh/g의 약 0.1의 C-레이트에서의 황-비용량을 갖는다. 전극이 복합 전극이고, 복합 재료가 황을 포함하고, 전극이 약 70 중량% 황으로 구성되는 일부 실시양태에서, 전극은 약 640 mAh/g 내지 약 700 mAh/g, 약 640 mAh/g 내지 약 800 mAh/g, 약 640 mAh/g 내지 약 900 mAh/g, 약 640 mAh/g 내지 약 1,000 mAh/g, 약 640 mAh/g 내지 약 1,400 mAh/g, 약 640 mAh/g 내지 약 1,800 mAh/g, 약 640 mAh/g 내지 약 2,200 mAh/g, 약 640 mAh/g 내지 약 2,600 mAh/g, 약 700 mAh/g 내지 약 800 mAh/g, 약 700 mAh/g 내지 약 900 mAh/g, 약 700 mAh/g 내지 약 1,000 mAh/g, 약 700 mAh/g 내지 약 1,400 mAh/g, 약 700 mAh/g 내지 약 1,800 mAh/g, 약 700 mAh/g 내지 약 2,200

mAh/g, 약 700 mAh/g 내지 약 2,600 mAh/g, 약 800 mAh/g 내지 약 900 mAh/g, 약 800 mAh/g 내지 약 1,000 mAh/g, 약 800 mAh/g 내지 약 1,400 mAh/g, 약 800 mAh/g 내지 약 1,800 mAh/g, 약 800 mAh/g 내지 약 2,200 mAh/g, 약 800 mAh/g 내지 약 2,600 mAh/g, 약 900 mAh/g 내지 약 1,000 mAh/g, 약 900 mAh/g 내지 약 1,400 mAh/g, 약 900 mAh/g 내지 약 1,800 mAh/g, 약 900 mAh/g 내지 약 2,200 mAh/g, 약 900 mAh/g 내지 약 2,600 mAh/g, 약 1,000 mAh/g 내지 약 1,400 mAh/g, 약 1,000 mAh/g 내지 약 1,800 mAh/g, 약 1,000 mAh/g 내지 약 2,200 mAh/g, 약 1,000 mAh/g 내지 약 2,600 mAh/g, 약 1,400 mAh/g 내지 약 1,800 mAh/g, 약 1,400 mAh/g 내지 약 2,200 mAh/g, 약 1,400 mAh/g 내지 약 2,600 mAh/g, 약 1,800 mAh/g 내지 약 2,200 mAh/g, 약 1,800 mAh/g 내지 약 2,600 mAh/g, 또는 약 2,200 mAh/g 내지 약 2,600 mAh/g의 약 0.1의 C-레이트에서의 황-비용량을 갖는다.

[0038] 전극이 복합 전극이고, 복합 재료가 황을 포함하고, 전극이 약 70 중량% 황으로 구성되는 일부 실시양태에서, 전극은 약 420 mAh/g 내지 약 1,700 mAh/g의, 약 50 사이클의 사용 후 약 0.1의 C-레이트에서의 황-비용량을 갖는다. 전극이 복합 전극이고, 복합 재료가 황을 포함하는 일부 실시양태에서, 전극은 적어도 약 420 mAh/g의, 약 50 사이클의 사용 후 약 0.1의 C-레이트에서의 황-비용량을 갖는다. 전극이 복합 전극이고, 복합 재료가 황을 포함하고, 전극이 약 70 중량% 황으로 구성되는 일부 실시양태에서, 전극은 최대 약 1,700 mAh/g의, 약 50 사이클의 사용 후 약 0.1의 C-레이트에서의 황-비용량을 갖는다. 전극이 복합 전극이고, 복합 재료가 황을 포함하고, 전극이 약 70 중량% 황으로 구성되는 일부 실시양태에서, 전극은 약 420 mAh/g 내지 약 450 mAh/g, 약 420 mAh/g 내지 약 500 mAh/g, 약 420 mAh/g 내지 약 600 mAh/g, 약 420 mAh/g 내지 약 800 mAh/g, 약 420 mAh/g 내지 약 1,000 mAh/g, 약 420 mAh/g 내지 약 1,200 mAh/g, 약 420 mAh/g 내지 약 1,400 mAh/g, 약 420 mAh/g 내지 약 1,700 mAh/g, 약 450 mAh/g 내지 약 500 mAh/g, 약 450 mAh/g 내지 약 600 mAh/g, 약 450 mAh/g 내지 약 800 mAh/g, 약 450 mAh/g 내지 약 1,000 mAh/g, 약 450 mAh/g 내지 약 1,200 mAh/g, 약 450 mAh/g 내지 약 1,400 mAh/g, 약 450 mAh/g 내지 약 1,700 mAh/g, 약 500 mAh/g 내지 약 600 mAh/g, 약 500 mAh/g 내지 약 800 mAh/g, 약 500 mAh/g 내지 약 1,000 mAh/g, 약 500 mAh/g 내지 약 1,200 mAh/g, 약 500 mAh/g 내지 약 1,400 mAh/g, 약 500 mAh/g 내지 약 1,700 mAh/g, 약 600 mAh/g 내지 약 800 mAh/g, 약 600 mAh/g 내지 약 1,000 mAh/g, 약 600 mAh/g 내지 약 1,200 mAh/g, 약 600 mAh/g 내지 약 1,400 mAh/g, 약 600 mAh/g 내지 약 1,700 mAh/g, 약 800 mAh/g 내지 약 1,000 mAh/g, 약 800 mAh/g 내지 약 1,200 mAh/g, 약 800 mAh/g 내지 약 1,400 mAh/g, 약 800 mAh/g 내지 약 1,700 mAh/g, 약 1,000 mAh/g 내지 약 1,200 mAh/g, 약 1,000 mAh/g 내지 약 1,400 mAh/g, 약 1,000 mAh/g 내지 약 1,700 mAh/g, 약 1,200 mAh/g 내지 약 1,400 mAh/g, 약 1,200 mAh/g 내지 약 1,700 mAh/g, 또는 약 1,400 mAh/g 내지 약 1,700 mAh/g의, 약 50 사이클의 사용 후 약 0.1의 C-레이트에서의 황-비용량을 갖는다.

[0039] 전극이 복합 전극이고, 복합 재료가 황을 포함하고, 전극이 약 80 중량% 황으로 구성되는 일부 실시양태에서, 전극은 약 600 mAh/g 내지 약 2,400 mAh/g의 약 0.1의 C-레이트에서의 황-비용량을 갖는다. 전극이 복합 전극이고, 복합 재료가 황을 포함하고, 전극이 약 80 중량% 황으로 구성되는 일부 실시양태에서, 전극은 적어도 약 600 mAh/g의 약 0.1의 C-레이트에서의 황-비용량을 갖는다. 전극이 복합 전극이고, 복합 재료가 황을 포함하고, 전극이 약 80 중량% 황으로 구성되는 일부 실시양태에서, 전극은 최대 약 2,400 mAh/g의 약 0.1의 C-레이트에서의 황-비용량을 갖는다. 전극이 복합 전극이고, 복합 재료가 황을 포함하고, 전극이 약 80 중량% 황으로 구성되는 일부 실시양태에서, 전극은 약 600 mAh/g 내지 약 800 mAh/g, 약 600 mAh/g 내지 약 1,000 mAh/g, 약 600 mAh/g 내지 약 1,200 mAh/g, 약 600 mAh/g 내지 약 1,400 mAh/g, 약 600 mAh/g 내지 약 1,800 mAh/g, 약 600 mAh/g 내지 약 2,000 mAh/g, 약 600 mAh/g 내지 약 2,200 mAh/g, 약 600 mAh/g 내지 약 2,400 mAh/g, 약 800 mAh/g 내지 약 1,000 mAh/g, 약 800 mAh/g 내지 약 1,200 mAh/g, 약 800 mAh/g 내지 약 1,400 mAh/g, 약 800 mAh/g 내지 약 1,800 mAh/g, 약 800 mAh/g 내지 약 2,000 mAh/g, 약 800 mAh/g 내지 약 2,200 mAh/g, 약 800 mAh/g 내지 약 2,400 mAh/g, 약 1,000 mAh/g 내지 약 1,200 mAh/g, 약 1,000 mAh/g 내지 약 1,400 mAh/g, 약 1,000 mAh/g 내지 약 1,800 mAh/g, 약 1,000 mAh/g 내지 약 2,000 mAh/g, 약 1,000 mAh/g 내지 약 2,200 mAh/g, 약 1,000 mAh/g 내지 약 2,400 mAh/g, 약 1,200 mAh/g 내지 약 1,400 mAh/g, 약 1,200 mAh/g 내지 약 1,800 mAh/g, 약 1,200 mAh/g 내지 약 2,000 mAh/g, 약 1,200 mAh/g 내지 약 2,200 mAh/g, 약 1,200 mAh/g 내지 약 2,400 mAh/g, 약 1,400 mAh/g 내지 약 1,800 mAh/g, 약 1,400 mAh/g 내지 약 2,000 mAh/g, 약 1,400 mAh/g 내지 약 2,200 mAh/g, 약 1,400 mAh/g 내지 약 2,400 mAh/g, 약 1,800 mAh/g 내지 약 2,000 mAh/g, 약 1,800 mAh/g 내지 약 2,200 mAh/g, 약 1,800 mAh/g 내지 약 2,400 mAh/g, 약 2,000 mAh/g 내지 약 2,200 mAh/g, 약 2,000 mAh/g 내지 약 2,400 mAh/g, 또는 약 2,200 mAh/g 내지 약 2,400 mAh/g의 약 0.1의 C-레이트에서의 황-비용량을 갖는다.

[0040] 전극이 복합 전극이고, 복합 재료가 황을 포함하고, 전극이 약 80 중량% 황으로 구성되는 일부 실시양태에서,

전극은 약 380 mAh/g 내지 약 1,550 mAh/g의, 약 50 사이클의 사용 후 약 0.1의 C-레이트에서의 황-비용량을 갖는다. 전극이 복합 전극이고, 복합 재료가 황을 포함하고, 전극이 약 80 중량% 황으로 구성되는 일부 실시양태에서, 전극은 적어도 약 380 mAh/g의, 약 50 사이클의 사용 후 약 0.1의 C-레이트에서의 황-비용량을 갖는다. 전극이 복합 전극이고, 복합 재료가 황을 포함하고, 전극이 약 80 중량% 황으로 구성되는 일부 실시양태에서, 전극은 최대 약 1,550 mAh/g의, 약 50 사이클의 사용 후 약 0.1의 C-레이트에서의 황-비용량을 갖는다. 전극이 복합 전극이고, 복합 재료가 황을 포함하고, 전극이 약 80 중량% 황으로 구성되는 일부 실시양태에서, 전극은 약 380 mAh/g 내지 약 400 mAh/g, 약 380 mAh/g 내지 약 500 mAh/g, 약 380 mAh/g 내지 약 600 mAh/g, 약 380 mAh/g 내지 약 800 mAh/g, 약 380 mAh/g 내지 약 1,000 mAh/g, 약 380 mAh/g 내지 약 1,200 mAh/g, 약 380 mAh/g 내지 약 1,550 mAh/g, 약 400 mAh/g 내지 약 500 mAh/g, 약 400 mAh/g 내지 약 600 mAh/g, 약 400 mAh/g 내지 약 800 mAh/g, 약 400 mAh/g 내지 약 1,000 mAh/g, 약 400 mAh/g 내지 약 1,200 mAh/g, 약 400 mAh/g 내지 약 1,550 mAh/g, 약 500 mAh/g 내지 약 600 mAh/g, 약 500 mAh/g 내지 약 800 mAh/g, 약 500 mAh/g 내지 약 1,000 mAh/g, 약 500 mAh/g 내지 약 1,200 mAh/g, 약 500 mAh/g 내지 약 1,550 mAh/g, 약 600 mAh/g 내지 약 800 mAh/g, 약 600 mAh/g 내지 약 1,000 mAh/g, 약 600 mAh/g 내지 약 1,200 mAh/g, 약 600 mAh/g 내지 약 1,550 mAh/g, 약 800 mAh/g 내지 약 1,000 mAh/g, 약 800 mAh/g 내지 약 1,200 mAh/g, 약 800 mAh/g 내지 약 1,550 mAh/g, 약 1,000 mAh/g 내지 약 1,200 mAh/g, 약 1,000 mAh/g 내지 약 1,550 mAh/g, 또는 약 1,200 mAh/g 내지 약 1,550 mAh/g의, 약 50 사이클의 사용 후 약 0.1의 C-레이트에서의 황-비용량을 갖는다.

[0041] 전극이 복합 전극이고, 복합 재료가 황을 포함하고, 전극이 약 90 중량% 황으로 구성되는 일부 실시양태에서, 전극은 약 500 mAh/g 내지 약 2,200 mAh/g의 약 0.1의 C-레이트에서의 황-비용량을 갖는다. 전극이 복합 전극이고, 복합 재료가 황을 포함하고, 전극이 약 90 중량% 황으로 구성되는 일부 실시양태에서, 전극은 적어도 약 500 mAh/g의 약 0.1의 C-레이트에서의 황-비용량을 갖는다. 전극이 복합 전극이고, 복합 재료가 황을 포함하고, 전극이 약 90 중량% 황으로 구성되는 일부 실시양태에서, 전극은 최대 약 2,200 mAh/g의 약 0.1의 C-레이트에서의 황-비용량을 갖는다. 전극이 복합 전극이고, 복합 재료가 황을 포함하고, 전극이 약 90 중량% 황으로 구성되는 일부 실시양태에서, 전극은 약 500 mAh/g 내지 약 700 mAh/g, 약 500 mAh/g 내지 약 900 mAh/g, 약 500 mAh/g 내지 약 1,000 mAh/g, 약 500 mAh/g 내지 약 1,400 mAh/g, 약 500 mAh/g 내지 약 1,800 mAh/g, 약 500 mAh/g 내지 약 2,200 mAh/g, 약 700 mAh/g 내지 약 900 mAh/g, 약 700 mAh/g 내지 약 1,000 mAh/g, 약 700 mAh/g 내지 약 1,400 mAh/g, 약 700 mAh/g 내지 약 1,800 mAh/g, 약 700 mAh/g 내지 약 2,200 mAh/g, 약 900 mAh/g 내지 약 1,000 mAh/g, 약 900 mAh/g 내지 약 1,400 mAh/g, 약 900 mAh/g 내지 약 1,800 mAh/g, 약 900 mAh/g 내지 약 2,200 mAh/g, 약 1,000 mAh/g 내지 약 1,400 mAh/g, 약 1,000 mAh/g 내지 약 1,800 mAh/g, 약 1,000 mAh/g 내지 약 2,200 mAh/g, 약 1,400 mAh/g 내지 약 1,800 mAh/g, 약 1,400 mAh/g 내지 약 2,200 mAh/g, 또는 약 1,800 mAh/g 내지 약 2,200 mAh/g의 약 0.1의 C-레이트에서의 황-비용량을 갖는다.

[0042] 전극이 복합 전극이고, 복합 재료가 황을 포함하고, 전극이 약 90 중량% 황으로 구성되는 일부 실시양태에서, 전극은 약 410 mAh/g 내지 약 1,650 mAh/g의, 약 10 사이클의 사용 후 약 0.1의 C-레이트에서의 황-비용량을 갖는다. 전극이 복합 전극이고, 복합 재료가 황을 포함하고, 전극이 약 90 중량% 황으로 구성되는 일부 실시양태에서, 전극은 적어도 약 410 mAh/g의, 약 10 사이클의 사용 후 약 0.1의 C-레이트에서의 황-비용량을 갖는다. 전극이 복합 전극이고, 복합 재료가 황을 포함하고, 전극이 약 90 중량% 황으로 구성되는 일부 실시양태에서, 전극은 최대 약 1,650 mAh/g의, 약 10 사이클의 사용 후 약 0.1의 C-레이트에서의 황-비용량을 갖는다. 전극이 복합 전극이고, 복합 재료가 황을 포함하고, 전극이 약 90 중량% 황으로 구성되는 일부 실시양태에서, 전극은 약 410 mAh/g 내지 약 450 mAh/g, 약 410 mAh/g 내지 약 500 mAh/g, 약 410 mAh/g 내지 약 600 mAh/g, 약 410 mAh/g 내지 약 800 mAh/g, 약 410 mAh/g 내지 약 1,000 mAh/g, 약 410 mAh/g 내지 약 1,200 mAh/g, 약 410 mAh/g 내지 약 1,400 mAh/g, 약 410 mAh/g 내지 약 1,650 mAh/g, 약 450 mAh/g 내지 약 500 mAh/g, 약 450 mAh/g 내지 약 600 mAh/g, 약 450 mAh/g 내지 약 800 mAh/g, 약 450 mAh/g 내지 약 1,000 mAh/g, 약 450 mAh/g 내지 약 1,200 mAh/g, 약 450 mAh/g 내지 약 1,400 mAh/g, 약 450 mAh/g 내지 약 1,650 mAh/g, 약 500 mAh/g 내지 약 600 mAh/g, 약 500 mAh/g 내지 약 800 mAh/g, 약 500 mAh/g 내지 약 1,000 mAh/g, 약 500 mAh/g 내지 약 1,200 mAh/g, 약 500 mAh/g 내지 약 1,400 mAh/g, 약 500 mAh/g 내지 약 1,650 mAh/g, 약 600 mAh/g 내지 약 800 mAh/g, 약 600 mAh/g 내지 약 1,000 mAh/g, 약 600 mAh/g 내지 약 1,200 mAh/g, 약 600 mAh/g 내지 약 1,400 mAh/g, 약 600 mAh/g 내지 약 1,650 mAh/g, 약 800 mAh/g 내지 약 1,000 mAh/g, 약 800 mAh/g 내지 약 1,200 mAh/g, 약 800 mAh/g 내지 약 1,400 mAh/g, 약 800 mAh/g 내지 약 1,650 mAh/g, 약 1,000 mAh/g 내지 약 1,200 mAh/g, 약 1,000 mAh/g 내지 약 1,400 mAh/g, 약 1,000 mAh/g 내지 약 1,650 mAh/g, 약 1,200 mAh/g 내지 약 1,400 mAh/g, 약 1,200 mAh/g 내지 약 1,650 mAh/g, 또는 약 1,400 mAh/g 내지 약 1,650 mAh/g의, 약 10 사이클의 사용 후 약 0.1의 C-레이트에서의 황-비용량을 갖는다.

[0043] 전극이 복합 전극이고, 복합 재료가 황을 포함하고, 전극이 약 90 중량% 황으로 구성되는 일부 실시양태에서, 전극은 약 400 mAh/g 내지 약 1,600 mAh/g의, 약 20 사이클의 사용 후 약 0.1의 C-레이트에서의 황-비용량을 갖는다. 전극이 복합 전극이고, 복합 재료가 황을 포함하고, 전극이 약 90 중량% 황으로 구성되는 일부 실시양태에서, 전극은 적어도 약 400 mAh/g의, 약 20 사이클의 사용 후 약 0.1의 C-레이트에서의 황-비용량을 갖는다. 전극이 복합 전극이고, 복합 재료가 황을 포함하고, 전극이 약 90 중량% 황으로 구성되는 일부 실시양태에서, 전극은 최대 약 1,600 mAh/g의, 약 20 사이클의 사용 후 약 0.1의 C-레이트에서의 황-비용량을 갖는다. 전극이 복합 전극이고, 복합 재료가 황을 포함하고, 전극이 약 90 중량% 황으로 구성되는 일부 실시양태에서, 전극은 약 400 mAh/g 내지 약 600 mAh/g, 약 400 mAh/g 내지 약 800 mAh/g, 약 400 mAh/g 내지 약 1,000 mAh/g, 약 400 mAh/g 내지 약 1,200 mAh/g, 약 400 mAh/g 내지 약 1,400 mAh/g, 약 400 mAh/g 내지 약 1,600 mAh/g, 약 600 mAh/g 내지 약 800 mAh/g, 약 600 mAh/g 내지 약 1,000 mAh/g, 약 600 mAh/g 내지 약 1,200 mAh/g, 약 600 mAh/g 내지 약 1,400 mAh/g, 약 600 mAh/g 내지 약 1,600 mAh/g, 약 800 mAh/g 내지 약 1,000 mAh/g, 약 800 mAh/g 내지 약 1,200 mAh/g, 약 800 mAh/g 내지 약 1,400 mAh/g, 약 800 mAh/g 내지 약 1,600 mAh/g, 약 1,000 mAh/g 내지 약 1,200 mAh/g, 약 1,000 mAh/g 내지 약 1,400 mAh/g, 약 1,000 mAh/g 내지 약 1,600 mAh/g, 약 1,200 mAh/g 내지 약 1,400 mAh/g, 약 1,200 mAh/g 내지 약 1,600 mAh/g, 또는 약 1,400 mAh/g 내지 약 1,600 mAh/g의, 약 20 사이클의 사용 후 약 0.1의 C-레이트에서의 황-비용량을 갖는다.

[0044] 전극이 복합 전극이고, 복합 재료가 황을 포함하고, 전극이 약 90 중량% 황으로 구성되는 일부 실시양태에서, 전극은 약 330 mAh/g 내지 약 1,500 mAh/g의, 약 50 사이클의 사용 후 약 0.1의 C-레이트에서의 황-비용량을 갖는다. 전극이 복합 전극이고, 복합 재료가 황을 포함하고, 전극이 약 90 중량% 황으로 구성되는 일부 실시양태에서, 전극은 적어도 약 330 mAh/g의, 약 50 사이클의 사용 후 약 0.1의 C-레이트에서의 황-비용량을 갖는다. 전극이 복합 전극이고, 복합 재료가 황을 포함하고, 전극이 약 90 중량% 황으로 구성되는 일부 실시양태에서, 전극은 최대 약 1,400 mAh/g의, 약 50 사이클의 사용 후 약 0.1의 C-레이트에서의 황-비용량을 갖는다. 전극이 복합 전극이고, 복합 재료가 황을 포함하고, 전극이 약 90 중량% 황으로 구성되는 일부 실시양태에서, 전극은 약 330 mAh/g 내지 약 450 mAh/g, 약 330 mAh/g 내지 약 500 mAh/g, 약 330 mAh/g 내지 약 600 mAh/g, 약 330 mAh/g 내지 약 800 mAh/g, 약 330 mAh/g 내지 약 1,000 mAh/g, 약 330 mAh/g 내지 약 1,200 mAh/g, 약 330 mAh/g 내지 약 1,400 mAh/g, 약 450 mAh/g 내지 약 500 mAh/g, 약 450 mAh/g 내지 약 600 mAh/g, 약 450 mAh/g 내지 약 800 mAh/g, 약 450 mAh/g 내지 약 1,000 mAh/g, 약 450 mAh/g 내지 약 1,200 mAh/g, 약 450 mAh/g 내지 약 1,400 mAh/g, 약 500 mAh/g 내지 약 600 mAh/g, 약 500 mAh/g 내지 약 800 mAh/g, 약 500 mAh/g 내지 약 1,000 mAh/g, 약 500 mAh/g 내지 약 1,200 mAh/g, 약 500 mAh/g 내지 약 1,400 mAh/g, 약 600 mAh/g 내지 약 800 mAh/g, 약 600 mAh/g 내지 약 1,000 mAh/g, 약 600 mAh/g 내지 약 1,200 mAh/g, 약 600 mAh/g 내지 약 1,400 mAh/g, 약 800 mAh/g 내지 약 1,000 mAh/g, 약 800 mAh/g 내지 약 1,200 mAh/g, 약 800 mAh/g 내지 약 1,400 mAh/g, 약 1,000 mAh/g 내지 약 1,200 mAh/g, 약 1,000 mAh/g 내지 약 1,400 mAh/g, 약 1,000 mAh/g 내지 약 1,500 mAh/g, 또는 약 1,200 mAh/g 내지 약 1,400 mAh/g의, 약 50 사이클의 사용 후 약 0.1의 C-레이트에서의 황-비용량을 갖는다.

[0045] 전극이 복합 전극이고, 복합 재료가 황을 포함하고, 전극이 약 90 중량% 황으로 구성되는 일부 실시양태에서, 전극은 약 480 mAh/g 내지 약 1,940 mAh/g의 약 0.1의 C-레이트에서의 전극-비용량을 갖는다. 전극이 복합 전극이고, 복합 재료가 황을 포함하고, 전극이 약 90 중량% 황으로 구성되는 일부 실시양태에서, 전극은 적어도 약 480 mAh/g의 약 0.1의 C-레이트에서의 전극-비용량을 갖는다. 전극이 복합 전극이고, 복합 재료가 황을 포함하고, 전극이 약 90 중량% 황으로 구성되는 일부 실시양태에서, 전극은 최대 약 1,940 mAh/g의 약 0.1의 C-레이트에서의 전극-비용량을 갖는다. 전극이 복합 전극이고, 복합 재료가 황을 포함하고, 전극이 약 90 중량% 황으로 구성되는 일부 실시양태에서, 전극은 약 480 mAh/g 내지 약 500 mAh/g, 약 480 mAh/g 내지 약 600 mAh/g, 약 480 mAh/g 내지 약 800 mAh/g, 약 480 mAh/g 내지 약 1,000 mAh/g, 약 480 mAh/g 내지 약 1,200 mAh/g, 약 480 mAh/g 내지 약 1,400 mAh/g, 약 480 mAh/g 내지 약 1,600 mAh/g, 약 480 mAh/g 내지 약 1,800 mAh/g, 약 480 mAh/g 내지 약 1,940 mAh/g, 약 500 mAh/g 내지 약 600 mAh/g, 약 500 mAh/g 내지 약 800 mAh/g, 약 500 mAh/g 내지 약 1,000 mAh/g, 약 500 mAh/g 내지 약 1,200 mAh/g, 약 500 mAh/g 내지 약 1,400 mAh/g, 약 500 mAh/g 내지 약 1,600 mAh/g, 약 500 mAh/g 내지 약 1,800 mAh/g, 약 500 mAh/g 내지 약 1,940 mAh/g, 약 600 mAh/g 내지 약 800 mAh/g, 약 600 mAh/g 내지 약 1,000 mAh/g, 약 600 mAh/g 내지 약 1,200 mAh/g, 약 600 mAh/g 내지 약 1,400 mAh/g, 약 600 mAh/g 내지 약 1,600 mAh/g, 약 600 mAh/g 내지 약 1,800 mAh/g, 약 600 mAh/g 내지 약 1,940 mAh/g, 약 800 mAh/g 내지 약 1,000 mAh/g, 약 800 mAh/g 내지 약 1,200 mAh/g, 약 800 mAh/g 내지 약 1,400 mAh/g, 약 800 mAh/g 내지 약 1,600 mAh/g, 약 800 mAh/g 내지 약 1,800 mAh/g, 약 800 mAh/g 내지 약 1,940 mAh/g, 약 1,000 mAh/g 내지 약 1,200 mAh/g, 약 1,000 mAh/g 내지 약 1,400 mAh/g, 약

1,000 mAh/g 내지 약 1,600 mAh/g, 약 1,000 mAh/g 내지 약 1,800 mAh/g, 약 1,000 mAh/g 내지 약 1,940 mAh/g, 약 1,200 mAh/g 내지 약 1,400 mAh/g, 약 1,200 mAh/g 내지 약 1,600 mAh/g, 약 1,200 mAh/g 내지 약 1,800 mAh/g, 약 1,200 mAh/g 내지 약 1,940 mAh/g, 약 1,400 mAh/g 내지 약 1,600 mAh/g, 약 1,400 mAh/g 내지 약 1,800 mAh/g, 약 1,400 mAh/g 내지 약 1,940 mAh/g, 약 1,600 mAh/g 내지 약 1,800 mAh/g, 약 1,600 mAh/g 내지 약 1,940 mAh/g, 또는 약 1,800 mAh/g 내지 약 1,940 mAh/g의 약 0.1의 C-레이트에서의 전극-비용량을 갖는다.

[0046] 전극이 복합 전극이고, 복합 재료가 황을 포함하고, 전극이 약 90 중량% 황으로 구성되는 일부 실시양태에서, 전극은 약 380 mAh/g 내지 약 1,550 mAh/g의 약 0.2의 C-레이트에서의 전극-비용량을 갖는다. 전극이 복합 전극이고, 복합 재료가 황을 포함하고, 전극이 약 90 중량% 황으로 구성되는 일부 실시양태에서, 전극은 적어도 약 380 mAh/g의 약 0.2의 C-레이트에서의 전극-비용량을 갖는다. 전극이 복합 전극이고, 복합 재료가 황을 포함하고, 전극이 약 90 중량% 황으로 구성되는 일부 실시양태에서, 전극은 최대 약 1,550 mAh/g의 약 0.2의 C-레이트에서의 전극-비용량을 갖는다. 전극이 복합 전극이고, 복합 재료가 황을 포함하고, 전극이 약 90 중량% 황으로 구성되는 일부 실시양태에서, 전극은 약 380 mAh/g 내지 약 400 mAh/g, 약 380 mAh/g 내지 약 500 mAh/g, 약 380 mAh/g 내지 약 600 mAh/g, 약 380 mAh/g 내지 약 800 mAh/g, 약 380 mAh/g 내지 약 1,000 mAh/g, 약 380 mAh/g 내지 약 1,200 mAh/g, 약 380 mAh/g 내지 약 1,400 mAh/g, 약 380 mAh/g 내지 약 1,550 mAh/g, 약 400 mAh/g 내지 약 500 mAh/g, 약 400 mAh/g 내지 약 600 mAh/g, 약 400 mAh/g 내지 약 800 mAh/g, 약 400 mAh/g 내지 약 1,000 mAh/g, 약 400 mAh/g 내지 약 1,200 mAh/g, 약 400 mAh/g 내지 약 1,400 mAh/g, 약 400 mAh/g 내지 약 1,550 mAh/g, 약 500 mAh/g 내지 약 600 mAh/g, 약 500 mAh/g 내지 약 800 mAh/g, 약 500 mAh/g 내지 약 1,000 mAh/g, 약 500 mAh/g 내지 약 1,200 mAh/g, 약 500 mAh/g 내지 약 1,400 mAh/g, 약 500 mAh/g 내지 약 1,550 mAh/g, 약 600 mAh/g 내지 약 800 mAh/g, 약 600 mAh/g 내지 약 1,000 mAh/g, 약 600 mAh/g 내지 약 1,200 mAh/g, 약 600 mAh/g 내지 약 1,400 mAh/g, 약 600 mAh/g 내지 약 1,550 mAh/g, 약 800 mAh/g 내지 약 1,000 mAh/g, 약 800 mAh/g 내지 약 1,200 mAh/g, 약 800 mAh/g 내지 약 1,400 mAh/g, 약 800 mAh/g 내지 약 1,550 mAh/g, 약 1,000 mAh/g 내지 약 1,200 mAh/g, 약 1,000 mAh/g 내지 약 1,400 mAh/g, 약 1,000 mAh/g 내지 약 1,550 mAh/g, 약 1,200 mAh/g 내지 약 1,400 mAh/g, 약 1,200 mAh/g 내지 약 1,550 mAh/g, 또는 약 1,400 mAh/g 내지 약 1,550 mAh/g의 약 0.2의 C-레이트에서의 전극-비용량을 갖는다.

[0047] 전극이 복합 전극이고, 복합 재료가 황을 포함하고, 전극이 약 90 중량% 황으로 구성되는 일부 실시양태에서, 전극은 약 300 mAh/g 내지 1,230 mAh/g의 약 0.5의 C-레이트에서의 전극-비용량을 갖는다. 전극이 복합 전극이고, 복합 재료가 황을 포함하고, 전극이 약 90 중량% 황으로 구성되는 일부 실시양태에서, 전극은 적어도 약 300 mAh/g의 약 0.5의 C-레이트에서의 전극-비용량을 갖는다. 전극이 복합 전극이고, 복합 재료가 황을 포함하고, 전극이 약 90 중량% 황으로 구성되는 일부 실시양태에서, 전극은 최대 약 1,230 mAh/g의 약 0.5의 C-레이트에서의 전극-비용량을 갖는다. 전극이 복합 전극이고, 복합 재료가 황을 포함하고, 전극이 약 90 중량% 황으로 구성되는 일부 실시양태에서, 전극은 약 300 mAh/g 내지 약 400 mAh/g, 약 300 mAh/g 내지 약 500 mAh/g, 약 300 mAh/g 내지 약 600 mAh/g, 약 300 mAh/g 내지 약 800 mAh/g, 약 300 mAh/g 내지 약 1,000 mAh/g, 약 300 mAh/g 내지 약 1,230 mAh/g, 약 400 mAh/g 내지 약 500 mAh/g, 약 400 mAh/g 내지 약 600 mAh/g, 약 400 mAh/g 내지 약 800 mAh/g, 약 400 mAh/g 내지 약 1,000 mAh/g, 약 400 mAh/g 내지 약 1,230 mAh/g, 약 500 mAh/g 내지 약 600 mAh/g, 약 500 mAh/g 내지 약 800 mAh/g, 약 500 mAh/g 내지 약 1,000 mAh/g, 약 500 mAh/g 내지 약 1,230 mAh/g, 약 600 mAh/g 내지 약 800 mAh/g, 약 600 mAh/g 내지 약 1,000 mAh/g, 약 600 mAh/g 내지 약 1,230 mAh/g, 약 800 mAh/g 내지 약 1,000 mAh/g, 약 800 mAh/g 내지 약 1,230 mAh/g, 또는 약 1,000 mAh/g 내지 약 1,230 mAh/g의 약 0.5의 C-레이트에서의 전극-비용량을 갖는다.

[0048] 전극이 복합 전극이고, 복합 재료가 황을 포함하고, 전극이 약 90 중량% 황으로 구성되는 일부 실시양태에서, 전극은 약 250 mAh/g 내지 약 1,000 mAh/g의 약 1.0의 C-레이트에서의 전극-비용량을 갖는다. 전극이 복합 전극이고, 복합 재료가 황을 포함하고, 전극이 약 90 중량% 황으로 구성되는 일부 실시양태에서, 전극은 적어도 약 250 mAh/g의 약 1.0의 C-레이트에서의 전극-비용량을 갖는다. 전극이 복합 전극이고, 복합 재료가 황을 포함하고, 전극이 약 90 중량% 황으로 구성되는 일부 실시양태에서, 전극은 최대 약 1,000 mAh/g의 약 1.0의 C-레이트에서의 전극-비용량을 갖는다. 전극이 복합 전극이고, 복합 재료가 황을 포함하고, 전극이 약 90 중량% 황으로 구성되는 일부 실시양태에서, 전극은 약 250 mAh/g 내지 약 300 mAh/g, 약 250 mAh/g 내지 약 400 mAh/g, 약 250 mAh/g 내지 약 500 mAh/g, 약 250 mAh/g 내지 약 600 mAh/g, 약 250 mAh/g 내지 약 700 mAh/g, 약 250 mAh/g 내지 약 800 mAh/g, 약 250 mAh/g 내지 약 900 mAh/g, 약 250 mAh/g 내지 약 1,000 mAh/g, 약 300 mAh/g 내지 약 400 mAh/g, 약 300 mAh/g 내지 약 500 mAh/g, 약 300 mAh/g 내지 약 600 mAh/g, 약 300 mAh/g 내지 약 700 mAh/g, 약 300 mAh/g 내지 약 800 mAh/g, 약 300 mAh/g 내지 약 900 mAh/g, 약 300 mAh/g 내지 약 1,000

mAh/g, 약 400 mAh/g 내지 약 500 mAh/g, 약 400 mAh/g 내지 약 600 mAh/g, 약 400 mAh/g 내지 약 700 mAh/g, 약 400 mAh/g 내지 약 800 mAh/g, 약 400 mAh/g 내지 약 900 mAh/g, 약 400 mAh/g 내지 약 1,000 mAh/g, 약 500 mAh/g 내지 약 600 mAh/g, 약 500 mAh/g 내지 약 700 mAh/g, 약 500 mAh/g 내지 약 800 mAh/g, 약 500 mAh/g 내지 약 900 mAh/g, 약 500 mAh/g 내지 약 1,000 mAh/g, 약 600 mAh/g 내지 약 700 mAh/g, 약 600 mAh/g 내지 약 800 mAh/g, 약 600 mAh/g 내지 약 900 mAh/g, 약 600 mAh/g 내지 약 1,000 mAh/g, 약 700 mAh/g 내지 약 800 mAh/g, 약 700 mAh/g 내지 약 900 mAh/g, 약 700 mAh/g 내지 약 1,000 mAh/g, 약 800 mAh/g 내지 약 900 mAh/g, 약 800 mAh/g 내지 약 1,000 mAh/g, 또는 약 900 mAh/g 내지 약 1,000 mAh/g의 약 1.0의 C-레이트에서의 전극-비용량을 갖는다.

[0049] 전극이 복합 전극이고, 복합 재료가 황을 포함하고, 전극이 약 90 중량% 황으로 구성되는 일부 실시양태에서, 전극은 약 190 mAh/g 내지 약 770 mAh/g의 약 2.0의 C-레이트에서의 전극-비용량을 갖는다. 전극이 복합 전극이고, 복합 재료가 황을 포함하고, 전극이 약 90 중량% 황으로 구성되는 일부 실시양태에서, 전극은 적어도 약 190 mAh/g의 약 2.0의 C-레이트에서의 전극-비용량을 갖는다. 전극이 복합 전극이고, 복합 재료가 황을 포함하고, 전극이 약 90 중량% 황으로 구성되는 일부 실시양태에서, 전극은 최대 약 770 mAh/g의 약 2.0의 C-레이트에서의 전극-비용량을 갖는다. 전극이 복합 전극이고, 복합 재료가 황을 포함하고, 전극이 약 90 중량% 황으로 구성되는 일부 실시양태에서, 전극은 약 190 mAh/g 내지 약 300 mAh/g, 약 190 mAh/g 내지 약 400 mAh/g, 약 190 mAh/g 내지 약 500 mAh/g, 약 190 mAh/g 내지 약 600 mAh/g, 약 190 mAh/g 내지 약 700 mAh/g, 약 190 mAh/g 내지 약 770 mAh/g, 약 300 mAh/g 내지 약 400 mAh/g, 약 300 mAh/g 내지 약 500 mAh/g, 약 300 mAh/g 내지 약 600 mAh/g, 약 300 mAh/g 내지 약 700 mAh/g, 약 300 mAh/g 내지 약 770 mAh/g, 약 400 mAh/g 내지 약 500 mAh/g, 약 400 mAh/g 내지 약 600 mAh/g, 약 400 mAh/g 내지 약 700 mAh/g, 약 400 mAh/g 내지 약 770 mAh/g, 약 500 mAh/g 내지 약 600 mAh/g, 약 500 mAh/g 내지 약 700 mAh/g, 약 500 mAh/g 내지 약 770 mAh/g, 약 600 mAh/g 내지 약 700 mAh/g, 약 600 mAh/g 내지 약 770 mAh/g, 또는 약 700 mAh/g 내지 약 770 mAh/g의 약 2.0의 C-레이트에서의 전극-비용량을 갖는다.

[0050] 전극이 복합 전극이고, 복합 재료가 황을 포함하고, 전극이 약 90 중량% 황으로 구성되는 일부 실시양태에서, 전극은 약 220 mAh/g 내지 약 880 mAh/g의 약 1.0의 C-레이트에서의 전극-비 방전 용량 (electrode-specific discharge capacity)을 갖는다. 전극이 복합 전극이고, 복합 재료가 황을 포함하고, 전극이 약 90 중량% 황으로 구성되는 일부 실시양태에서, 전극은 적어도 약 220 mAh/g의 약 1.0의 C-레이트에서의 전극-비 방전 용량을 갖는다. 전극이 복합 전극이고, 복합 재료가 황을 포함하고, 전극이 약 90 중량% 황으로 구성되는 일부 실시양태에서, 전극은 최대 약 880 mAh/g의 약 1.0의 C-레이트에서의 전극-비 방전 용량을 갖는다. 전극이 복합 전극이고, 복합 재료가 황을 포함하고, 전극이 약 90 중량% 황으로 구성되는 일부 실시양태에서, 전극은 약 220 mAh/g 내지 약 250 mAh/g, 약 220 mAh/g 내지 약 300 mAh/g, 약 220 mAh/g 내지 약 350 mAh/g, 약 220 mAh/g 내지 약 400 mAh/g, 약 220 mAh/g 내지 약 450 mAh/g, 약 220 mAh/g 내지 약 500 mAh/g, 약 220 mAh/g 내지 약 600 mAh/g, 약 220 mAh/g 내지 약 700 mAh/g, 약 220 mAh/g 내지 약 800 mAh/g, 약 220 mAh/g 내지 약 880 mAh/g, 약 250 mAh/g 내지 약 300 mAh/g, 약 250 mAh/g 내지 약 350 mAh/g, 약 250 mAh/g 내지 약 400 mAh/g, 약 250 mAh/g 내지 약 450 mAh/g, 약 250 mAh/g 내지 약 500 mAh/g, 약 250 mAh/g 내지 약 600 mAh/g, 약 250 mAh/g 내지 약 700 mAh/g, 약 250 mAh/g 내지 약 800 mAh/g, 약 250 mAh/g 내지 약 880 mAh/g, 약 300 mAh/g 내지 약 350 mAh/g, 약 300 mAh/g 내지 약 400 mAh/g, 약 300 mAh/g 내지 약 450 mAh/g, 약 300 mAh/g 내지 약 500 mAh/g, 약 300 mAh/g 내지 약 600 mAh/g, 약 300 mAh/g 내지 약 700 mAh/g, 약 300 mAh/g 내지 약 800 mAh/g, 약 300 mAh/g 내지 약 880 mAh/g, 약 350 mAh/g 내지 약 400 mAh/g, 약 350 mAh/g 내지 약 450 mAh/g, 약 350 mAh/g 내지 약 500 mAh/g, 약 350 mAh/g 내지 약 600 mAh/g, 약 350 mAh/g 내지 약 700 mAh/g, 약 350 mAh/g 내지 약 800 mAh/g, 약 350 mAh/g 내지 약 880 mAh/g, 약 400 mAh/g 내지 약 450 mAh/g, 약 400 mAh/g 내지 약 500 mAh/g, 약 400 mAh/g 내지 약 600 mAh/g, 약 400 mAh/g 내지 약 700 mAh/g, 약 400 mAh/g 내지 약 800 mAh/g, 약 400 mAh/g 내지 약 880 mAh/g, 약 450 mAh/g 내지 약 500 mAh/g, 약 450 mAh/g 내지 약 600 mAh/g, 약 450 mAh/g 내지 약 700 mAh/g, 약 450 mAh/g 내지 약 800 mAh/g, 약 450 mAh/g 내지 약 880 mAh/g, 약 500 mAh/g 내지 약 600 mAh/g, 약 500 mAh/g 내지 약 700 mAh/g, 약 500 mAh/g 내지 약 800 mAh/g, 약 500 mAh/g 내지 약 880 mAh/g, 약 600 mAh/g 내지 약 700 mAh/g, 약 600 mAh/g 내지 약 800 mAh/g, 약 600 mAh/g 내지 약 880 mAh/g, 약 700 mAh/g 내지 약 800 mAh/g, 약 700 mAh/g 내지 약 880 mAh/g, 또는 약 800 mAh/g 내지 약 880 mAh/g의 약 1.0의 C-레이트에서의 전극-비 방전 용량을 갖는다.

[0051] 전극이 복합 전극이고, 복합 재료가 황을 포함하고, 전극이 약 90 중량% 황으로 구성되는 일부 실시양태에서, 전극은 약 445 mAh/g 내지 약 950 mAh/g의, 약 1.0의 C-레이트에서 및 30 사이클 후 전극-비 방전 용량을 갖는다. 전극이 복합 전극이고, 복합 재료가 황을 포함하고, 전극이 약 90 중량% 황으로 구성되는 일부 실시양태에

서, 전극은 적어도 약 445 mAh/g의, 약 1.0의 C-레이트에서 및 약 30 사이클의 사용 후 전극-비 방전 용량을 갖는다. 전극이 복합 전극이고, 복합 재료가 황을 포함하고, 전극이 약 90 중량% 황으로 구성되는 일부 실시양태에서, 전극은 최대 약 950 mAh/g의, 약 1.0의 C-레이트에서 및 약 30 사이클의 사용 후 전극-비 방전 용량을 갖는다. 전극이 복합 전극이고, 복합 재료가 황을 포함하고, 전극이 약 90 중량% 황으로 구성되는 일부 실시양태에서, 전극은 약 445 mAh/g 내지 약 500 mAh/g, 약 445 mAh/g 내지 약 600 mAh/g, 약 445 mAh/g 내지 약 700 mAh/g, 약 445 mAh/g 내지 약 800 mAh/g, 약 445 mAh/g 내지 약 900 mAh/g, 약 445 mAh/g 내지 약 950 mAh/g, 약 500 mAh/g 내지 약 600 mAh/g, 약 500 mAh/g 내지 약 700 mAh/g, 약 500 mAh/g 내지 약 800 mAh/g, 약 500 mAh/g 내지 약 900 mAh/g, 약 500 mAh/g 내지 약 950 mAh/g, 약 600 mAh/g 내지 약 700 mAh/g, 약 600 mAh/g 내지 약 800 mAh/g, 약 600 mAh/g 내지 약 900 mAh/g, 약 600 mAh/g 내지 약 950 mAh/g, 약 700 mAh/g 내지 약 800 mAh/g, 약 700 mAh/g 내지 약 900 mAh/g, 약 700 mAh/g 내지 약 950 mAh/g, 약 800 mAh/g 내지 약 900 mAh/g, 약 800 mAh/g 내지 약 950 mAh/g, 또는 약 900 mAh/g 내지 약 950 mAh/g의, 약 1.0의 C-레이트에서 및 약 30 사이클의 사용 후 전극-비 방전 용량을 갖는다.

[0052] 전극이 복합 전극이고, 복합 재료가 황을 포함하고, 전극이 약 90 중량% 황으로 구성되는 일부 실시양태에서, 전극은 약 170 mAh/g 내지 약 680 mAh/g의, 약 1.0의 C-레이트에서 및 약 500 사이클의 사용 후 전극-비 방전 용량을 갖는다. 전극이 복합 전극이고, 복합 재료가 황을 포함하고, 전극이 약 90 중량% 황으로 구성되는 일부 실시양태에서, 전극은 적어도 약 170 mAh/g의, 약 1.0의 C-레이트에서 및 약 500 사이클의 사용 후 전극-비 방전 용량을 갖는다. 전극이 복합 전극이고, 복합 재료가 황을 포함하고, 전극이 약 90 중량% 황으로 구성되는 일부 실시양태에서, 전극은 최대 약 680 mAh/g의, 약 1.0의 C-레이트에서 및 약 500 사이클의 사용 후 전극-비 방전 용량을 갖는다. 전극이 복합 전극이고, 복합 재료가 황을 포함하고, 전극이 약 90 중량% 황으로 구성되는 일부 실시양태에서, 전극은 약 170 mAh/g 내지 약 200 mAh/g, 약 170 mAh/g 내지 약 300 mAh/g, 약 170 mAh/g 내지 약 400 mAh/g, 약 170 mAh/g 내지 약 500 mAh/g, 약 170 mAh/g 내지 약 600 mAh/g, 약 170 mAh/g 내지 약 680 mAh/g, 약 200 mAh/g 내지 약 300 mAh/g, 약 200 mAh/g 내지 약 400 mAh/g, 약 200 mAh/g 내지 약 500 mAh/g, 약 200 mAh/g 내지 약 600 mAh/g, 약 200 mAh/g 내지 약 680 mAh/g, 약 300 mAh/g 내지 약 400 mAh/g, 약 300 mAh/g 내지 약 500 mAh/g, 약 300 mAh/g 내지 약 600 mAh/g, 약 300 mAh/g 내지 약 680 mAh/g, 약 400 mAh/g 내지 약 500 mAh/g, 약 400 mAh/g 내지 약 600 mAh/g, 약 400 mAh/g 내지 약 680 mAh/g, 약 500 mAh/g 내지 약 600 mAh/g, 약 500 mAh/g 내지 약 680 mAh/g, 또는 약 600 mAh/g 내지 약 680 mAh/g의, 약 1.0의 C-레이트에서 및 약 500 사이클의 사용 후 전극-비 방전 용량을 갖는다.

[0053] 전극이 복합 전극이고, 복합 재료가 황을 포함하고, 전극이 약 90 중량% 황으로 구성되는 일부 실시양태에서, 전극은 약 0.025% 내지 약 1%의 약 1.0의 C-레이트에서의 전극-비용량 저하를 갖는다. 전극이 복합 전극이고, 복합 재료가 황을 포함하고, 전극이 약 90 중량% 황으로 구성되는 일부 실시양태에서, 전극은 적어도 약 0.025%의, 약 1.0의 C-레이트에서의 전극-비용량 저하를 갖는다. 전극이 복합 전극이고, 복합 재료가 황을 포함하고, 전극이 약 90 중량% 황으로 구성되는 일부 실시양태에서, 전극은 최대 약 1%의 약 1.0의 C-레이트에서의 전극-비용량 저하를 갖는다. 전극이 복합 전극이고, 복합 재료가 황을 포함하고, 전극이 약 90 중량% 황으로 구성되는 일부 실시양태에서, 전극은 약 0.025% 내지 약 0.05%, 약 0.025% 내지 약 0.1%, 약 0.025% 내지 약 0.25%, 약 0.025% 내지 약 0.5%, 약 0.025% 내지 약 0.75%, 약 0.025% 내지 약 1%, 약 0.05% 내지 약 0.1%, 약 0.05% 내지 약 0.25%, 약 0.05% 내지 약 0.5%, 약 0.05% 내지 약 0.75%, 약 0.05% 내지 약 1%, 약 0.1% 내지 약 0.25%, 약 0.1% 내지 약 0.5%, 약 0.1% 내지 약 0.75%, 약 0.1% 내지 약 1%, 약 0.25% 내지 약 0.5%, 약 0.25% 내지 약 0.75%, 약 0.25% 내지 약 1%, 약 0.5% 내지 약 0.75%, 약 0.5% 내지 약 1%, 또는 약 0.75% 내지 약 1%의 약 1.0의 C-레이트에서의 전극-비용량 저하를 갖는다.

[0054] 일부 실시양태에서, 전극은 복합 전극이며, 여기서 복합 재료는 전이 금속 산화물을 포함한다.

[0055] 일부 실시양태에서, 전이 금속 산화물은 Nb_2O_5, Al_2O_3, V_2O_5, Re_2O_7, CrO_3, CeO_2, RuO_2, ZrO_2, MoO_3, WO_3, TiO_2, 또는 그의 임의의 조합을 포함한다.

[0056] 전극이 복합 전극이고, 복합 재료가 전이 금속 산화물을 포함하는 일부 실시양태에서, 전극은 약 40% 내지 약 95%의 로딩 비를 갖는다. 전극이 복합 전극이고, 복합 재료가 전이 금속 산화물을 포함하는 일부 실시양태에서, 전극은 적어도 약 40%의 로딩 비를 갖는다. 전극이 복합 전극이고, 복합 재료가 전이 금속 산화물을 포함하는 일부 실시양태에서, 전극은 최대 약 95%의 로딩 비를 갖는다. 전극이 복합 전극이고, 복합 재료가 전이 금속 산화물을 포함하는 일부 실시양태에서, 전극은 약 40% 내지 약 50%, 약 40% 내지 약 60%, 약 40% 내지 약 70%, 약 40% 내지 약 80%, 약 40% 내지 약 90%, 약 40% 내지 약 95%, 약 50% 내지 약 60%, 약 50% 내

지 약 70%, 약 50% 내지 약 80%, 약 50% 내지 약 90%, 약 50% 내지 약 95%, 약 60% 내지 약 70%, 약 60% 내지 약 80%, 약 60% 내지 약 90%, 약 60% 내지 약 95%, 약 70% 내지 약 80%, 약 70% 내지 약 90%, 약 70% 내지 약 95%, 약 80% 내지 약 90%, 약 80% 내지 약 95% 또는 약 90% 내지 약 95%의 로딩 비를 갖는다.

[0057] 전극이 복합 전극이고, 복합 재료가 전이 금속 산화물을 포함하는 일부 실시양태에서, 전극은 전극-비 중량측정 정전용량 약 250 F/g 내지 약 2,000 F/g을 갖는다. 전극이 복합 전극이고, 복합 재료가 전이 금속 산화물을 포함하는 일부 실시양태에서, 전극은 적어도 약 250 F/g의 전극-비 중량측정 정전용량을 갖는다. 전극이 복합 전극이고, 복합 재료가 전이 금속 산화물을 포함하는 일부 실시양태에서, 전극은 최대 약 2,000 F/g의 전극-비 중량측정 정전용량을 갖는다. 전극이 복합 전극이고, 복합 재료가 전이 금속 산화물을 포함하는 일부 실시양태에서, 전극은 전극-비 중량측정 정전용량 약 250 F/g 내지 약 500 F/g, 약 250 F/g 내지 약 750 F/g, 약 250 F/g 내지 약 1,000 F/g, 약 250 F/g 내지 약 1,250 F/g, 약 250 F/g 내지 약 1,500 F/g, 약 250 F/g 내지 약 1,750 F/g, 약 250 F/g 내지 약 2,000 F/g, 약 500 F/g 내지 약 750 F/g, 약 500 F/g 내지 약 1,000 F/g, 약 500 F/g 내지 약 1,250 F/g, 약 500 F/g 내지 약 1,500 F/g, 약 500 F/g 내지 약 1,750 F/g, 약 500 F/g 내지 약 2,000 F/g, 약 750 F/g 내지 약 1,000 F/g, 약 750 F/g 내지 약 1,250 F/g, 약 750 F/g 내지 약 1,500 F/g, 약 750 F/g 내지 약 1,750 F/g, 약 750 F/g 내지 약 2,000 F/g, 약 1,000 F/g 내지 약 1,250 F/g, 약 1,000 F/g 내지 약 1,500 F/g, 약 1,000 F/g 내지 약 1,750 F/g, 약 1,000 F/g 내지 약 2,000 F/g, 약 1,250 F/g 내지 약 1,500 F/g, 약 1,250 F/g 내지 약 1,750 F/g, 약 1,250 F/g 내지 약 2,000 F/g, 약 1,500 F/g 내지 약 1,750 F/g, 약 1,500 F/g 내지 약 2,000 F/g, 또는 약 1,750 F/g 내지 약 2,000 F/g을 갖는다.

[0058] 전극이 복합 전극이고, 복합 재료가 전이 금속 산화물을 포함하는 일부 실시양태에서, 전극은 약 0.5 V 내지 약 4 V의 작동 전압 전위를 갖는다. 전극이 복합 전극이고, 복합 재료가 전이 금속 산화물을 포함하는 일부 실시양태에서, 전극은 적어도 약 0.5 V의 작동 전압 전위를 갖는다. 전극이 복합 전극이고, 복합 재료가 전이 금속 산화물을 포함하는 일부 실시양태에서, 전극은 최대 약 4 V의 작동 전압 전위를 갖는다. 전극이 복합 전극이고, 복합 재료가 전이 금속 산화물을 포함하는 일부 실시양태에서, 전극은 약 0.5 V 내지 약 0.75 V, 약 0.5 V 내지 약 1 V, 약 0.5 V 내지 약 2 V, 약 0.5 V 내지 약 3 V, 약 0.5 V 내지 약 4 V, 약 0.75 V 내지 약 1 V, 약 0.75 V 내지 약 2 V, 약 0.75 V 내지 약 3 V, 약 0.75 V 내지 약 4 V, 약 1 V 내지 약 2 V, 약 1 V 내지 약 3 V, 약 1 V 내지 약 4 V, 약 2 V 내지 약 3 V, 약 2 V 내지 약 4 V, 또는 약 3 V 내지 약 4 V의 작동 전압 전위를 갖는다.

[0059] 본원에 제공된 제2 실시양태는 제1 전극, 제2 전극 및 전해질을 포함하는 에너지 저장 장치이며, 여기서 제1 전극 및 제2 전극 중 적어도 1개는 3D 그래핀 프레임워크를 포함하고, 여기서 3D 그래핀 프레임워크는 다공성 구조를 갖는 그래핀 시트의 상호연결된 전도성 네트워크를 포함하며, 여기서 제1 전극 및 제2 전극 중 적어도 1개는 용량성 또는 슈도-용량성 물질을 포함하는 복합 재료를 추가로 포함한다.

[0060] 일부 실시양태에서, 3D 그래핀 프레임워크는 구멍이 많은 3D 그래핀 프레임워크를 포함한다.

[0061] 일부 실시양태에서, 전해질은 리튬 헥사플루오로포스페이트, 아이오도메탄, 디메틸 술페이트, 디메틸 카르보네이트, 테트라메틸암모늄 클로라이드, 메틸 트리플레이트, 디아조메탄, 메틸 플루오로술포네이트 에틸 아세테이트, 아세톤, 디메틸포름아미드, 아세토니트릴, 디메틸 술폭시드, 니트로메탄, 프로필렌 카르보네이트, 에틸렌 카르보네이트, 리튬 비스(트리플루오로메탄술포닐)이미드, 1,2-디메톡시에탄, 1,3-디옥솔란, 질산리튬, 또는 그의 임의의 조합을 포함하는 비-수성 전해질이다.

[0062] 일부 실시양태에서, 에너지 저장 장치는 약 16 Wh/kg 내지 약 750 Wh/kg의 적층-비 에너지 밀도 (stack-specific energy density)를 갖는다. 일부 실시양태에서, 에너지 저장 장치는 적어도 약 16 Wh/kg의 적층-비 에너지 밀도를 갖는다. 일부 실시양태에서, 에너지 저장 장치는 최대 약 750 Wh/kg의 적층-비 에너지 밀도를 갖는다. 일부 실시양태에서, 에너지 저장 장치는 약 16 Wh/kg 내지 약 25 Wh/kg, 약 16 Wh/kg 내지 약 50 Wh/kg, 약 16 Wh/kg 내지 약 100 Wh/kg, 약 16 Wh/kg 내지 약 200 Wh/kg, 약 16 Wh/kg 내지 약 400 Wh/kg, 약 16 Wh/kg 내지 약 600 Wh/kg, 약 16 Wh/kg 내지 약 750 Wh/kg, 약 25 Wh/kg 내지 약 50 Wh/kg, 약 25 Wh/kg 내지 약 100 Wh/kg, 약 25 Wh/kg 내지 약 200 Wh/kg, 약 25 Wh/kg 내지 약 400 Wh/kg, 약 25 Wh/kg 내지 약 600 Wh/kg, 약 25 Wh/kg 내지 약 750 Wh/kg, 약 50 Wh/kg 내지 약 100 Wh/kg, 약 50 Wh/kg 내지 약 200 Wh/kg, 약 50 Wh/kg 내지 약 400 Wh/kg, 약 50 Wh/kg 내지 약 600 Wh/kg, 약 50 Wh/kg 내지 약 750 Wh/kg, 약 100 Wh/kg 내지 약 200 Wh/kg, 약 100 Wh/kg 내지 약 400 Wh/kg, 약 100 Wh/kg 내지 약 600 Wh/kg, 약 100 Wh/kg 내지 약 750 Wh/kg, 약 200 Wh/kg 내지 약 400 Wh/kg, 약 200 Wh/kg 내지 약 600 Wh/kg, 약 200 Wh/kg 내지 약 750 Wh/kg, 약 400 Wh/kg 내지 약 600 Wh/kg, 약 400 Wh/kg 내지 약 750 Wh/kg, 또는 약 600 Wh/kg 내지 약 750

Wh/kg의 적층-비 에너지 밀도를 갖는다.

[0063] 일부 실시양태에서, 에너지 저장 장치는 약 0.5 kW/kg 내지 약 20 kW/kg의 적층-비 출력 밀도 (stack-specific power density)를 갖는다. 일부 실시양태에서, 에너지 저장 장치는 적어도 약 0.5 kW/kg의 적층-비 출력 밀도를 갖는다. 일부 실시양태에서, 에너지 저장 장치는 최대 약 20 kW/kg의 적층-비 출력 밀도를 갖는다. 일부 실시양태에서, 에너지 저장 장치는 적층-비 출력 밀도 약 0.5 kW/kg 내지 약 1 kW/kg, 약 0.5 kW/kg 내지 약 2 kW/kg, 약 0.5 kW/kg 내지 약 5 kW/kg, 약 0.5 kW/kg 내지 약 10 kW/kg, 약 0.5 kW/kg 내지 약 15 kW/kg, 약 0.5 kW/kg 내지 약 20 kW/kg, 약 1 kW/kg 내지 약 2 kW/kg, 약 1 kW/kg 내지 약 5 kW/kg, 약 1 kW/kg 내지 약 10 kW/kg, 약 1 kW/kg 내지 약 15 kW/kg, 약 1 kW/kg 내지 약 20 kW/kg, 약 2 kW/kg 내지 약 5 kW/kg, 약 2 kW/kg 내지 약 10 kW/kg, 약 2 kW/kg 내지 약 15 kW/kg, 약 2 kW/kg 내지 약 20 kW/kg, 약 5 kW/kg 내지 약 10 kW/kg, 약 5 kW/kg 내지 약 15 kW/kg, 약 5 kW/kg 내지 약 20 kW/kg, 약 10 kW/kg 내지 약 15 kW/kg, 약 10 kW/kg 내지 약 20 kW/kg, 또는 약 15 kW/kg 내지 약 20 kW/kg을 갖는다.

[0064] 일부 실시양태에서, 에너지 저장 장치는 약 16 Wh/kg 내지 약 900 Wh/kg의 전극-비 중량측정 에너지 밀도 (electrode-specific gravimetric energy density)를 갖는다. 일부 실시양태에서, 에너지 저장 장치는 적어도 약 16 Wh/kg의 전극-비 중량측정 에너지 밀도를 갖는다. 일부 실시양태에서, 에너지 저장 장치는 최대 약 900 Wh/kg의 전극-비 중량측정 에너지 밀도를 갖는다. 일부 실시양태에서, 에너지 저장 장치는 약 16 Wh/kg 내지 약 25 Wh/kg, 약 16 Wh/kg 내지 약 50 Wh/kg, 약 16 Wh/kg 내지 약 100 Wh/kg, 약 16 Wh/kg 내지 약 200 Wh/kg, 약 16 Wh/kg 내지 약 400 Wh/kg, 약 16 Wh/kg 내지 약 600 Wh/kg, 약 16 Wh/kg 내지 약 800 Wh/kg, 약 16 Wh/kg 내지 약 900 Wh/kg, 약 25 Wh/kg 내지 약 50 Wh/kg, 약 25 Wh/kg 내지 약 100 Wh/kg, 약 25 Wh/kg 내지 약 200 Wh/kg, 약 25 Wh/kg 내지 약 400 Wh/kg, 약 25 Wh/kg 내지 약 600 Wh/kg, 약 25 Wh/kg 내지 약 800 Wh/kg, 약 25 Wh/kg 내지 약 900 Wh/kg, 약 50 Wh/kg 내지 약 100 Wh/kg, 약 50 Wh/kg 내지 약 200 Wh/kg, 약 50 Wh/kg 내지 약 400 Wh/kg, 약 50 Wh/kg 내지 약 600 Wh/kg, 약 50 Wh/kg 내지 약 800 Wh/kg, 약 50 Wh/kg 내지 약 900 Wh/kg, 약 100 Wh/kg 내지 약 200 Wh/kg, 약 100 Wh/kg 내지 약 400 Wh/kg, 약 100 Wh/kg 내지 약 600 Wh/kg, 약 100 Wh/kg 내지 약 800 Wh/kg, 약 100 Wh/kg 내지 약 900 Wh/kg, 약 200 Wh/kg 내지 약 400 Wh/kg, 약 200 Wh/kg 내지 약 600 Wh/kg, 약 200 Wh/kg 내지 약 800 Wh/kg, 약 200 Wh/kg 내지 약 900 Wh/kg, 약 400 Wh/kg 내지 약 600 Wh/kg, 약 400 Wh/kg 내지 약 800 Wh/kg, 약 400 Wh/kg 내지 약 900 Wh/kg, 약 600 Wh/kg 내지 약 800 Wh/kg, 약 600 Wh/kg 내지 약 900 Wh/kg, 또는 약 800 Wh/kg 내지 약 900 Wh/kg의 전극-비 중량측정 에너지 밀도를 갖는다.

[0065] 일부 실시양태에서, 에너지 저장 장치는 약 0.5 kW/kg 내지 약 40 kW/kg의 전극-비 중량측정 출력 밀도 (electrode-specific gravimetric power density)를 갖는다. 일부 실시양태에서, 에너지 저장 장치는 적어도 약 0.5 kW/kg의 전극-비 중량측정 출력 밀도를 갖는다. 일부 실시양태에서, 에너지 저장 장치는 최대 약 40 kW/kg의 전극-비 중량측정 출력 밀도를 갖는다. 일부 실시양태에서, 에너지 저장 장치는 약 0.5 kW/kg 내지 약 1 kW/kg, 약 0.5 kW/kg 내지 약 2 kW/kg, 약 0.5 kW/kg 내지 약 5 kW/kg, 약 0.5 kW/kg 내지 약 10 kW/kg, 약 0.5 kW/kg 내지 약 20 kW/kg, 약 0.5 kW/kg 내지 약 30 kW/kg, 약 0.5 kW/kg 내지 약 40 kW/kg, 약 1 kW/kg 내지 약 2 kW/kg, 약 1 kW/kg 내지 약 5 kW/kg, 약 1 kW/kg 내지 약 10 kW/kg, 약 1 kW/kg 내지 약 20 kW/kg, 약 1 kW/kg 내지 약 30 kW/kg, 약 1 kW/kg 내지 약 40 kW/kg, 약 2 kW/kg 내지 약 5 kW/kg, 약 2 kW/kg 내지 약 10 kW/kg, 약 2 kW/kg 내지 약 20 kW/kg, 약 2 kW/kg 내지 약 30 kW/kg, 약 2 kW/kg 내지 약 40 kW/kg, 약 5 kW/kg 내지 약 10 kW/kg, 약 5 kW/kg 내지 약 20 kW/kg, 약 5 kW/kg 내지 약 30 kW/kg, 약 5 kW/kg 내지 약 40 kW/kg, 약 10 kW/kg 내지 약 20 kW/kg, 약 10 kW/kg 내지 약 30 kW/kg, 약 10 kW/kg 내지 약 40 kW/kg, 약 20 kW/kg 내지 약 30 kW/kg, 약 20 kW/kg 내지 약 40 kW/kg, 또는 약 30 kW/kg 내지 약 40 kW/kg의 전극-비 중량측정 출력 밀도를 갖는다.

[0066] 일부 실시양태에서, 에너지 저장 장치는 약 0.001 F 내지 약 10 F의 총 정전용량을 갖는다. 일부 실시양태에서, 에너지 저장 장치는 적어도 약 0.001 F의 총 정전용량을 갖는다. 일부 실시양태에서, 에너지 저장 장치는 최대 약 10 F의 총 정전용량을 갖는다. 일부 실시양태에서, 에너지 저장 장치는 약 0.001 F 내지 약 0.005 F, 약 0.001 F 내지 약 0.01 F, 약 0.001 F 내지 약 0.05 F, 약 0.001 F 내지 약 0.1 F, 약 0.001 F 내지 약 0.5 F, 약 0.001 F 내지 약 1 F, 약 0.001 F 내지 약 5 F, 약 0.001 F 내지 약 10 F, 약 0.005 F 내지 약 0.01 F, 약 0.005 F 내지 약 0.05 F, 약 0.005 F 내지 약 0.1 F, 약 0.005 F 내지 약 0.5 F, 약 0.005 F 내지 약 1 F, 약 0.005 F 내지 약 5 F, 약 0.005 F 내지 약 10 F, 약 0.01 F 내지 약 0.05 F, 약 0.01 F 내지 약 0.1 F, 약 0.01 F 내지 약 0.5 F, 약 0.01 F 내지 약 1 F, 약 0.01 F 내지 약 5 F, 약 0.01 F 내지 약 10 F, 약 0.05 F 내지 약 0.1 F, 약 0.05 F 내지 약 0.5 F, 약 0.05 F 내지 약 1 F, 약 0.05 F 내지 약 5 F, 약 0.05

F 내지 약 10 F, 약 0.1 F 내지 약 0.5 F, 약 0.1 F 내지 약 1 F, 약 0.1 F 내지 약 5 F, 약 0.1 F 내지 약 10 F, 약 0.5 F 내지 약 1 F, 약 0.5 F 내지 약 5 F, 약 0.5 F 내지 약 10 F, 약 1 F 내지 약 5 F, 약 1 F 내지 약 10 F, 또는 약 5 F 내지 약 10 F의 총 정전용량을 갖는다.

[0067] 일부 실시양태에서, 에너지 저장 장치는 파우치 전지이다. 일부 실시양태에서, 에너지 저장 장치는 코인 전지이다. 일부 실시양태에서, 제1 전극이 캐소드이고, 제2 전극은 애노드이다. 일부 실시양태에서, 제1 전극이 애노드이고, 제2 전극은 캐소드이며, 여기서 전해질은 비-수성 전해질이다.

[0068] 일부 실시양태에서, 애노드가 복합 전극을 포함하며, 여기서 복합 재료는 규소를 포함하고, 여기서 캐소드는 복합 전극을 포함하며, 여기서 복합 재료는 황을 포함한다.

[0069] 일부 실시양태에서, 에너지 저장 장치는 약 11 Wh/m^2 내지 약 45 Wh/m^2의 면적 에너지 밀도를 갖는다. 일부 실시양태에서, 에너지 저장 장치는 적어도 약 11 Wh/m^2의 면적 에너지 밀도를 갖는다. 일부 실시양태에서, 에너지 저장 장치는 최대 약 45 Wh/m^2의 면적 에너지 밀도를 갖는다. 일부 실시양태에서, 에너지 저장 장치는 약 11 Wh/m^2 내지 약 15 Wh/m^2, 약 11 Wh/m^2 내지 약 20 Wh/m^2, 약 11 Wh/m^2 내지 약 25 Wh/m^2, 약 11 Wh/m^2 내지 약 30 Wh/m^2, 약 11 Wh/m^2 내지 약 35 Wh/m^2, 약 11 Wh/m^2 내지 약 45 Wh/m^2, 약 15 Wh/m^2 내지 약 20 Wh/m^2, 약 15 Wh/m^2 내지 약 25 Wh/m^2, 약 15 Wh/m^2 내지 약 30 Wh/m^2, 약 15 Wh/m^2 내지 약 35 Wh/m^2, 약 15 Wh/m^2 내지 약 45 Wh/m^2, 약 20 Wh/m^2 내지 약 25 Wh/m^2, 약 20 Wh/m^2 내지 약 30 Wh/m^2, 약 20 Wh/m^2 내지 약 35 Wh/m^2, 약 20 Wh/m^2 내지 약 45 Wh/m^2, 약 25 Wh/m^2 내지 약 30 Wh/m^2, 약 25 Wh/m^2 내지 약 35 Wh/m^2, 약 25 Wh/m^2 내지 약 45 Wh/m^2, 약 30 Wh/m^2 내지 약 35 Wh/m^2, 약 30 Wh/m^2 내지 약 45 Wh/m^2, 또는 약 35 Wh/m^2 내지 약 45 Wh/m^2의 면적 에너지 밀도를 갖는다.

[0070] 일부 실시양태에서, 에너지 저장 장치는 약 85 kW/m^2 내지 약 360 kW/m^2의 면적 출력 밀도를 갖는다. 일부 실시양태에서, 에너지 저장 장치는 적어도 약 85 kW/m^2의 면적 출력 밀도를 갖는다. 일부 실시양태에서, 에너지 저장 장치는 최대 약 360 kW/m^2의 면적 출력 밀도를 갖는다. 일부 실시양태에서, 에너지 저장 장치는 면적 출력 밀도 약 85 kW/m^2 내지 약 100 kW/m^2, 약 85 kW/m^2 내지 약 150 kW/m^2, 약 85 kW/m^2 내지 약 200 kW/m^2, 약 85 kW/m^2 내지 약 250 kW/m^2, 약 85 kW/m^2 내지 약 300 kW/m^2, 약 85 kW/m^2 내지 약 360 kW/m^2, 약 100 kW/m^2 내지 약 150 kW/m^2, 약 100 kW/m^2 내지 약 200 kW/m^2, 약 100 kW/m^2 내지 약 250 kW/m^2, 약 100 kW/m^2 내지 약 300 kW/m^2, 약 100 kW/m^2 내지 약 360 kW/m^2, 약 150 kW/m^2 내지 약 200 kW/m^2, 약 150 kW/m^2 내지 약 250 kW/m^2, 약 150 kW/m^2 내지 약 300 kW/m^2, 약 150 kW/m^2 내지 약 360 kW/m^2, 약 200 kW/m^2 내지 약 250 kW/m^2, 약 200 kW/m^2 내지 약 300 kW/m^2, 약 200 kW/m^2 내지 약 360 kW/m^2, 약 250 kW/m^2 내지 약 300 kW/m^2, 약 250 kW/m^2 내지 약 360 kW/m^2, 또는 약 300 kW/m^2 내지 약 360 kW/m^2를 갖는다.

[0071] 일부 실시양태에서, 에너지 저장 장치는 적층-비 에너지 밀도 약 6 Wh/kg 내지 약 70 Wh/kg을 갖는다. 일부 실시양태에서, 에너지 저장 장치는 적어도 약 6 Wh/kg의 적층-비 에너지 밀도를 갖는다. 일부 실시양태에서, 에너지 저장 장치는 최대 약 70 Wh/kg의 적층-비 에너지 밀도를 갖는다. 일부 실시양태에서, 에너지 저장 장치는 적층-비 에너지 밀도 약 6 Wh/kg 내지 약 10 Wh/kg, 약 6 Wh/kg 내지 약 20 Wh/kg, 약 6 Wh/kg 내지 약 30 Wh/kg, 약 6 Wh/kg 내지 약 40 Wh/kg, 약 6 Wh/kg 내지 약 50 Wh/kg, 약 6 Wh/kg 내지 약 60 Wh/kg, 약 6 Wh/kg 내지 약 70 Wh/kg, 약 10 Wh/kg 내지 약 20 Wh/kg, 약 10 Wh/kg 내지 약 30 Wh/kg, 약 10 Wh/kg 내지 약 40 Wh/kg, 약 10 Wh/kg 내지 약 50 Wh/kg, 약 10 Wh/kg 내지 약 60 Wh/kg, 약 10 Wh/kg 내지 약 70 Wh/kg, 약 20 Wh/kg 내지 약 30 Wh/kg, 약 20 Wh/kg 내지 약 40 Wh/kg, 약 20 Wh/kg 내지 약 50 Wh/kg, 약 20 Wh/kg 내지 약 60 Wh/kg, 약 20 Wh/kg 내지 약 70 Wh/kg, 약 30 Wh/kg 내지 약 40 Wh/kg, 약 30 Wh/kg 내지 약 50 Wh/kg, 약 30 Wh/kg 내지 약 60 Wh/kg, 약 30 Wh/kg 내지 약 70 Wh/kg, 약 40 Wh/kg 내지 약 50 Wh/kg, 약 40 Wh/kg 내지 약 60 Wh/kg, 약 40 Wh/kg 내지 약 70 Wh/kg, 약 50 Wh/kg 내지 약 60 Wh/kg, 약 50 Wh/kg 내지 약 70 Wh/kg, 또는 약 60 Wh/kg 내지 약 70 Wh/kg을 갖는다.

[0072] 일부 실시양태에서, 에너지 저장 장치는 적층-비 부피측정 에너지 밀도 (stack-specific volumetric energy

density) 약 25 Wh/L 내지 약 100 Wh/L를 갖는다. 일부 실시양태에서, 에너지 저장 장치는 적어도 약 25 Wh/L의 적층-비 부피측정 에너지 밀도를 갖는다. 일부 실시양태에서, 에너지 저장 장치는 최대 약 100 Wh/L의 적층-비 부피측정 에너지 밀도를 갖는다. 일부 실시양태에서, 에너지 저장 장치는 적층-비 부피측정 에너지 밀도 약 25 Wh/L 내지 약 30 Wh/L, 약 25 Wh/L 내지 약 40 Wh/L, 약 25 Wh/L 내지 약 50 Wh/L, 약 25 Wh/L 내지 약 60 Wh/L, 약 25 Wh/L 내지 약 70 Wh/L, 약 25 Wh/L 내지 약 80 Wh/L, 약 25 Wh/L 내지 약 90 Wh/L, 약 25 Wh/L 내지 약 100 Wh/L, 약 30 Wh/L 내지 약 40 Wh/L, 약 30 Wh/L 내지 약 50 Wh/L, 약 30 Wh/L 내지 약 60 Wh/L, 약 30 Wh/L 내지 약 70 Wh/L, 약 30 Wh/L 내지 약 80 Wh/L, 약 30 Wh/L 내지 약 90 Wh/L, 약 30 Wh/L 내지 약 100 Wh/L, 약 40 Wh/L 내지 약 50 Wh/L, 약 40 Wh/L 내지 약 60 Wh/L, 약 40 Wh/L 내지 약 70 Wh/L, 약 40 Wh/L 내지 약 80 Wh/L, 약 40 Wh/L 내지 약 90 Wh/L, 약 40 Wh/L 내지 약 100 Wh/L, 약 50 Wh/L 내지 약 60 Wh/L, 약 50 Wh/L 내지 약 70 Wh/L, 약 50 Wh/L 내지 약 80 Wh/L, 약 50 Wh/L 내지 약 90 Wh/L, 약 50 Wh/L 내지 약 100 Wh/L, 약 60 Wh/L 내지 약 70 Wh/L, 약 60 Wh/L 내지 약 80 Wh/L, 약 60 Wh/L 내지 약 90 Wh/L, 약 60 Wh/L 내지 약 100 Wh/L, 약 70 Wh/L 내지 약 80 Wh/L, 약 70 Wh/L 내지 약 90 Wh/L, 약 70 Wh/L 내지 약 100 Wh/L, 약 80 Wh/L 내지 약 90 Wh/L, 약 80 Wh/L 내지 약 100 Wh/L, 또는 약 90 Wh/L 내지 약 100 Wh/L을 갖는다.

[0073] 일부 실시양태에서, 에너지 저장 장치는 약 1.5 Wh/kg 내지 약 240 Wh/kg의 전극-비 중량측정 에너지 밀도를 갖는다. 일부 실시양태에서, 에너지 저장 장치는 적어도 약 1.5 Wh/kg의 전극-비 중량측정 에너지 밀도를 갖는다. 일부 실시양태에서, 에너지 저장 장치는 최대 약 240 Wh/kg의 전극-비 중량측정 에너지 밀도를 갖는다. 일부 실시양태에서, 에너지 저장 장치는 약 1.5 Wh/kg 내지 약 5 Wh/kg, 약 1.5 Wh/kg 내지 약 10 Wh/kg, 약 1.5 Wh/kg 내지 약 20 Wh/kg, 약 1.5 Wh/kg 내지 약 50 Wh/kg, 약 1.5 Wh/kg 내지 약 100 Wh/kg, 약 1.5 Wh/kg 내지 약 150 Wh/kg, 약 1.5 Wh/kg 내지 약 200 Wh/kg, 약 1.5 Wh/kg 내지 약 240 Wh/kg, 약 5 Wh/kg 내지 약 10 Wh/kg, 약 5 Wh/kg 내지 약 20 Wh/kg, 약 5 Wh/kg 내지 약 50 Wh/kg, 약 5 Wh/kg 내지 약 100 Wh/kg, 약 5 Wh/kg 내지 약 150 Wh/kg, 약 5 Wh/kg 내지 약 200 Wh/kg, 약 5 Wh/kg 내지 약 240 Wh/kg, 약 10 Wh/kg 내지 약 20 Wh/kg, 약 10 Wh/kg 내지 약 50 Wh/kg, 약 10 Wh/kg 내지 약 100 Wh/kg, 약 10 Wh/kg 내지 약 150 Wh/kg, 약 10 Wh/kg 내지 약 200 Wh/kg, 약 10 Wh/kg 내지 약 240 Wh/kg, 약 20 Wh/kg 내지 약 50 Wh/kg, 약 20 Wh/kg 내지 약 100 Wh/kg, 약 20 Wh/kg 내지 약 150 Wh/kg, 약 20 Wh/kg 내지 약 200 Wh/kg, 약 20 Wh/kg 내지 약 240 Wh/kg, 약 50 Wh/kg 내지 약 100 Wh/kg, 약 50 Wh/kg 내지 약 150 Wh/kg, 약 50 Wh/kg 내지 약 200 Wh/kg, 약 50 Wh/kg 내지 약 240 Wh/kg, 약 100 Wh/kg 내지 약 150 Wh/kg, 약 100 Wh/kg 내지 약 200 Wh/kg, 약 100 Wh/kg 내지 약 240 Wh/kg, 약 150 Wh/kg 내지 약 200 Wh/kg, 약 150 Wh/kg 내지 약 240 Wh/kg, 또는 약 200 Wh/kg 내지 약 240 Wh/kg의 전극-비 중량측정 에너지 밀도를 갖는다.

[0074] 일부 실시양태에서, 에너지 저장 장치는 약 1.5 kW/kg 내지 약 40 kW/kg의 전극-비 중량측정 출력 밀도를 갖는다. 일부 실시양태에서, 에너지 저장 장치는 적어도 약 1.5 kW/kg의 전극-비 중량측정 출력 밀도를 갖는다. 일부 실시양태에서, 에너지 저장 장치는 최대 약 40 kW/kg의 전극-비 중량측정 출력 밀도를 갖는다. 일부 실시양태에서, 에너지 저장 장치는 약 1.5 kW/kg 내지 약 5 kW/kg, 약 1.5 kW/kg 내지 약 10 kW/kg, 약 1.5 kW/kg 내지 약 20 kW/kg, 약 1.5 kW/kg 내지 약 30 kW/kg, 약 1.5 kW/kg 내지 약 40 kW/kg, 약 5 kW/kg 내지 약 10 kW/kg, 약 5 kW/kg 내지 약 20 kW/kg, 약 5 kW/kg 내지 약 30 kW/kg, 약 5 kW/kg 내지 약 40 kW/kg, 약 10 kW/kg 내지 약 20 kW/kg, 약 10 kW/kg 내지 약 30 kW/kg, 약 10 kW/kg 내지 약 40 kW/kg, 약 20 kW/kg 내지 약 30 kW/kg, 약 20 kW/kg 내지 약 40 kW/kg, 또는 약 30 kW/kg 내지 약 40 kW/kg의 전극-비 중량측정 출력 밀도를 갖는다.

[0075] 일부 실시양태에서, 에너지 저장 장치는 약 100 F 내지 약 1,000 F의 총 정전용량을 갖는다. 일부 실시양태에서, 에너지 저장 장치는 적어도 약 100 F의 총 정전용량을 갖는다. 일부 실시양태에서, 에너지 저장 장치는 최대 약 1,000 F의 총 정전용량을 갖는다. 일부 실시양태에서, 에너지 저장 장치는 약 500 F 내지 약 100 F, 약 500 F 내지 약 200 F, 약 500 F 내지 약 300 F, 약 500 F 내지 약 400 F, 약 500 F 내지 약 500 F, 약 500 F 내지 약 750 F, 약 500 F 내지 약 1,000 F, 약 100 F 내지 약 200 F, 약 100 F 내지 약 300 F, 약 100 F 내지 약 400 F, 약 100 F 내지 약 500 F, 약 100 F 내지 약 750 F, 약 100 F 내지 약 1,000 F, 약 200 F 내지 약 300 F, 약 200 F 내지 약 400 F, 약 200 F 내지 약 500 F, 약 200 F 내지 약 750 F, 약 200 F 내지 약 1,000 F, 약 300 F 내지 약 400 F, 약 300 F 내지 약 500 F, 약 300 F 내지 약 750 F, 약 300 F 내지 약 1,000 F, 약 400 F 내지 약 500 F, 약 400 F 내지 약 750 F, 약 400 F 내지 약 1,000 F, 약 500 F 내지 약 750 F, 약 500 F 내지 약 1,000 F, 또는 약 750 F 내지 약 1,000 F의 총 정전용량을 갖는다.

[0076] 일부 실시양태에서, 전극은 복합 재료를 포함하는 복합 전극을 포함하며, 여기서 복합 재료는 규소를 포함한다.

[0077] 전극이 복합 재료를 포함하는 복합 전극을 포함하고, 복합 재료가 규소를 포함하는 일부 실시양태에서, 에너지 저장 장치는 적층-비 에너지 밀도 약 20 Wh/kg 내지 약 200 Wh/kg을 갖는다. 전극이 복합 재료를 포함하는 복합 전극을 포함하고, 복합 재료가 규소를 포함하는 일부 실시양태에서, 에너지 저장 장치는 적어도 약 20 Wh/kg의 적층-비 에너지 밀도를 갖는다. 전극이 복합 재료를 포함하는 복합 전극을 포함하고, 복합 재료가 규소를 포함하는 일부 실시양태에서, 에너지 저장 장치는 최대 약 200 Wh/kg의 적층-비 에너지 밀도를 갖는다. 전극이 복합 재료를 포함하는 복합 전극을 포함하고, 복합 재료가 규소를 포함하는 일부 실시양태에서, 에너지 저장 장치는 적층-비 에너지 밀도 약 20 Wh/kg 내지 약 40 Wh/kg, 약 20 Wh/kg 내지 약 60 Wh/kg, 약 20 Wh/kg 내지 약 80 Wh/kg, 약 20 Wh/kg 내지 약 100 Wh/kg, 약 20 Wh/kg 내지 약 120 Wh/kg, 약 20 Wh/kg 내지 약 160 Wh/kg, 약 20 Wh/kg 내지 약 180 Wh/kg, 약 20 Wh/kg 내지 약 200 Wh/kg, 약 40 Wh/kg 내지 약 60 Wh/kg, 약 40 Wh/kg 내지 약 80 Wh/kg, 약 40 Wh/kg 내지 약 100 Wh/kg, 약 40 Wh/kg 내지 약 120 Wh/kg, 약 40 Wh/kg 내지 약 160 Wh/kg, 약 40 Wh/kg 내지 약 180 Wh/kg, 약 40 Wh/kg 내지 약 200 Wh/kg, 약 60 Wh/kg 내지 약 80 Wh/kg, 약 60 Wh/kg 내지 약 100 Wh/kg, 약 60 Wh/kg 내지 약 120 Wh/kg, 약 60 Wh/kg 내지 약 160 Wh/kg, 약 60 Wh/kg 내지 약 180 Wh/kg, 약 60 Wh/kg 내지 약 200 Wh/kg, 약 80 Wh/kg 내지 약 100 Wh/kg, 약 80 Wh/kg 내지 약 120 Wh/kg, 약 80 Wh/kg 내지 약 160 Wh/kg, 약 80 Wh/kg 내지 약 180 Wh/kg, 약 80 Wh/kg 내지 약 200 Wh/kg, 약 100 Wh/kg 내지 약 120 Wh/kg, 약 100 Wh/kg 내지 약 160 Wh/kg, 약 100 Wh/kg 내지 약 180 Wh/kg, 약 100 Wh/kg 내지 약 200 Wh/kg, 약 120 Wh/kg 내지 약 160 Wh/kg, 약 120 Wh/kg 내지 약 180 Wh/kg, 약 120 Wh/kg 내지 약 200 Wh/kg, 약 160 Wh/kg 내지 약 180 Wh/kg, 약 160 Wh/kg 내지 약 200 Wh/kg, 또는 약 180 Wh/kg 내지 약 200 Wh/kg을 갖는다.

[0078] 전극이 복합 재료를 포함하는 복합 전극을 포함하고, 복합 재료가 규소를 포함하는 일부 실시양태에서, 에너지 저장 장치는 약 0.5 kW/kg 내지 약 20 kW/kg의 적층-비 출력 밀도를 갖는다. 전극이 복합 재료를 포함하는 복합 전극을 포함하고, 복합 재료가 규소를 포함하는 일부 실시양태에서, 에너지 저장 장치는 적어도 약 0.5 kW/kg의 적층-비 출력 밀도를 갖는다. 전극이 복합 재료를 포함하는 복합 전극을 포함하고, 복합 재료가 규소를 포함하는 일부 실시양태에서, 에너지 저장 장치는 최대 약 20 kW/kg의 적층-비 출력 밀도를 갖는다. 전극이 복합 재료를 포함하는 복합 전극을 포함하고, 복합 재료가 규소를 포함하는 일부 실시양태에서, 에너지 저장 장치는 약 0.5 kW/kg 내지 약 1 kW/kg, 약 0.5 kW/kg 내지 약 2 kW/kg, 약 0.5 kW/kg 내지 약 5 kW/kg, 약 0.5 kW/kg 내지 약 10 kW/kg, 약 0.5 kW/kg 내지 약 15 kW/kg, 약 0.5 kW/kg 내지 약 20 kW/kg, 약 1 kW/kg 내지 약 2 kW/kg, 약 1 kW/kg 내지 약 5 kW/kg, 약 1 kW/kg 내지 약 10 kW/kg, 약 1 kW/kg 내지 약 15 kW/kg, 약 1 kW/kg 내지 약 20 kW/kg, 약 2 kW/kg 내지 약 5 kW/kg, 약 2 kW/kg 내지 약 10 kW/kg, 약 2 kW/kg 내지 약 15 kW/kg, 약 2 kW/kg 내지 약 20 kW/kg, 약 5 kW/kg 내지 약 10 kW/kg, 약 5 kW/kg 내지 약 15 kW/kg, 약 5 kW/kg 내지 약 20 kW/kg, 약 10 kW/kg 내지 약 15 kW/kg, 약 10 kW/kg 내지 약 20 kW/kg, 또는 약 15 kW/kg 내지 약 20 kW/kg의 적층-비 출력 밀도를 갖는다.

[0079] 전극이 복합 재료를 포함하는 복합 전극을 포함하고, 복합 재료가 규소를 포함하는 일부 실시양태에서, 에너지 저장 장치는 약 60 Wh/kg 내지 약 500 Wh/kg의 전극-비 중량측정 에너지 밀도를 갖는다. 전극이 복합 재료를 포함하는 복합 전극을 포함하고, 복합 재료가 규소를 포함하는 일부 실시양태에서, 에너지 저장 장치는 적어도 약 60 Wh/kg의 전극-비 중량측정 에너지 밀도를 갖는다. 전극이 복합 재료를 포함하는 복합 전극을 포함하고, 복합 재료가 규소를 포함하는 일부 실시양태에서, 에너지 저장 장치는 최대 약 500 Wh/kg의 전극-비 중량측정 에너지 밀도를 갖는다. 전극이 복합 재료를 포함하는 복합 전극을 포함하고, 복합 재료가 규소를 포함하는 일부 실시양태에서, 에너지 저장 장치는 약 60 Wh/kg 내지 약 80 Wh/kg, 약 60 Wh/kg 내지 약 100 Wh/kg, 약 60 Wh/kg 내지 약 150 Wh/kg, 약 60 Wh/kg 내지 약 200 Wh/kg, 약 60 Wh/kg 내지 약 250 Wh/kg, 약 60 Wh/kg 내지 약 300 Wh/kg, 약 60 Wh/kg 내지 약 350 Wh/kg, 약 60 Wh/kg 내지 약 400 Wh/kg, 약 60 Wh/kg 내지 약 500 Wh/kg, 약 80 Wh/kg 내지 약 100 Wh/kg, 약 80 Wh/kg 내지 약 150 Wh/kg, 약 80 Wh/kg 내지 약 200 Wh/kg, 약 80 Wh/kg 내지 약 250 Wh/kg, 약 80 Wh/kg 내지 약 300 Wh/kg, 약 80 Wh/kg 내지 약 350 Wh/kg, 약 80 Wh/kg 내지 약 400 Wh/kg, 약 80 Wh/kg 내지 약 500 Wh/kg, 약 100 Wh/kg 내지 약 150 Wh/kg, 약 100 Wh/kg 내지 약 200 Wh/kg, 약 100 Wh/kg 내지 약 250 Wh/kg, 약 100 Wh/kg 내지 약 300 Wh/kg, 약 100 Wh/kg 내지 약 350 Wh/kg, 약 100 Wh/kg 내지 약 400 Wh/kg, 약 100 Wh/kg 내지 약 500 Wh/kg, 약 150 Wh/kg 내지 약 200 Wh/kg, 약 150 Wh/kg 내지 약 250 Wh/kg, 약 150 Wh/kg 내지 약 300 Wh/kg, 약 150 Wh/kg 내지 약 350 Wh/kg, 약 150 Wh/kg 내지 약 400 Wh/kg, 약 150 Wh/kg 내지 약 500 Wh/kg, 약 200 Wh/kg 내지 약 250 Wh/kg, 약 200 Wh/kg 내지 약 300 Wh/kg, 약 200 Wh/kg 내지 약 350 Wh/kg, 약 200 Wh/kg 내지 약 400 Wh/kg, 약 200 Wh/kg 내지 약 500 Wh/kg, 약 250 Wh/kg 내지 약 300 Wh/kg, 약 250 Wh/kg 내지 약 350 Wh/kg, 약 250 Wh/kg 내지 약 400 Wh/kg, 약 250 Wh/kg 내지 약 500 Wh/kg, 약 300 Wh/kg 내지 약 350 Wh/kg, 약 300 Wh/kg 내지 약 400 Wh/kg,

약 300 Wh/kg 내지 약 500 Wh/kg, 약 350 Wh/kg 내지 약 400 Wh/kg, 약 350 Wh/kg 내지 약 500 Wh/kg, 또는 약 400 Wh/kg 내지 약 500 Wh/kg의 전극-비 중량측정 에너지 밀도를 갖는다.

[0080] 전극이 복합 재료를 포함하는 복합 전극을 포함하고, 복합 재료가 규소를 포함하는 일부 실시양태에서, 에너지 저장 장치는 약 1.5 kW/kg 내지 약 20 kW/kg의 전극-비 중량측정 출력 밀도를 갖는다. 전극이 복합 재료를 포함하는 복합 전극을 포함하고, 복합 재료가 규소를 포함하는 일부 실시양태에서, 에너지 저장 장치는 적어도 약 1.5 kW/kg의 전극-비 중량측정 출력 밀도를 갖는다. 전극이 복합 재료를 포함하는 복합 전극을 포함하고, 복합 재료가 규소를 포함하는 일부 실시양태에서, 에너지 저장 장치는 최대 약 20 kW/kg의 전극-비 중량측정 출력 밀도를 갖는다. 전극이 복합 재료를 포함하는 복합 전극을 포함하고, 복합 재료가 규소를 포함하는 일부 실시양태에서, 에너지 저장 장치는 약 1.5 kW/kg 내지 약 2 kW/kg, 약 1.5 kW/kg 내지 약 3 kW/kg, 약 1.5 kW/kg 내지 약 5 kW/kg, 약 1.5 kW/kg 내지 약 10 kW/kg, 약 1.5 kW/kg 내지 약 15 kW/kg, 약 1.5 kW/kg 내지 약 20 kW/kg, 약 2 kW/kg 내지 약 3 kW/kg, 약 2 kW/kg 내지 약 5 kW/kg, 약 2 kW/kg 내지 약 10 kW/kg, 약 2 kW/kg 내지 약 15 kW/kg, 약 2 kW/kg 내지 약 20 kW/kg, 약 3 kW/kg 내지 약 5 kW/kg, 약 3 kW/kg 내지 약 10 kW/kg, 약 3 kW/kg 내지 약 15 kW/kg, 약 3 kW/kg 내지 약 20 kW/kg, 약 5 kW/kg 내지 약 10 kW/kg, 약 5 kW/kg 내지 약 15 kW/kg, 약 5 kW/kg 내지 약 20 kW/kg, 약 10 kW/kg 내지 약 15 kW/kg, 약 10 kW/kg 내지 약 20 kW/kg, 또는 약 15 kW/kg 내지 약 20 kW/kg의 전극-비 중량측정 출력 밀도를 갖는다.

[0081] 전극이 복합 재료를 포함하는 복합 전극을 포함하고, 복합 재료가 규소를 포함하는 일부 실시양태에서, 에너지 저장 장치는 약 50 F 내지 약 1,000 F의 총 정전용량을 갖는다. 전극이 복합 재료를 포함하는 복합 전극을 포함하고, 복합 재료가 규소를 포함하는 일부 실시양태에서, 에너지 저장 장치는 적어도 약 50 F의 총 정전용량을 갖는다. 전극이 복합 재료를 포함하는 복합 전극을 포함하고, 복합 재료가 규소를 포함하는 일부 실시양태에서, 에너지 저장 장치는 최대 약 1,000 F의 총 정전용량을 갖는다. 전극이 복합 재료를 포함하는 복합 전극을 포함하고, 복합 재료가 규소를 포함하는 일부 실시양태에서, 에너지 저장 장치는 약 50 F 내지 약 100 F, 약 50 F 내지 약 200 F, 약 50 F 내지 약 300 F, 약 50 F 내지 약 400 F, 약 50 F 내지 약 500 F, 약 50 F 내지 약 750 F, 약 50 F 내지 약 1,000 F, 약 100 F 내지 약 200 F, 약 100 F 내지 약 300 F, 약 100 F 내지 약 400 F, 약 100 F 내지 약 500 F, 약 100 F 내지 약 750 F, 약 100 F 내지 약 1,000 F, 약 200 F 내지 약 300 F, 약 200 F 내지 약 400 F, 약 200 F 내지 약 500 F, 약 200 F 내지 약 750 F, 약 200 F 내지 약 1,000 F, 약 300 F 내지 약 400 F, 약 300 F 내지 약 500 F, 약 300 F 내지 약 750 F, 약 300 F 내지 약 1,000 F, 약 400 F 내지 약 500 F, 약 400 F 내지 약 750 F, 약 400 F 내지 약 1,000 F, 약 500 F 내지 약 750 F, 약 500 F 내지 약 1,000 F, 또는 약 750 F 내지 약 1,000 F의 총 정전용량을 갖는다.

[0082] 일부 실시양태에서, 전극은 복합 재료를 포함하는 복합 전극을 포함하며, 여기서 복합 재료는 황을 포함한다.

[0083] 전극이 복합 재료를 포함하는 복합 전극을 포함하고, 복합 재료가 황을 포함하는 일부 실시양태에서, 에너지 저장 장치는 약 16 Wh/kg 내지 약 750 Wh/kg의 적층-비 에너지 밀도를 갖는다. 전극이 복합 재료를 포함하는 복합 전극을 포함하고, 복합 재료가 황을 포함하는 일부 실시양태에서, 에너지 저장 장치는 적어도 약 16 Wh/kg의 적층-비 에너지 밀도를 갖는다. 전극이 복합 재료를 포함하는 복합 전극을 포함하고, 복합 재료가 황을 포함하는 일부 실시양태에서, 에너지 저장 장치는 최대 약 750 Wh/kg의 적층-비 에너지 밀도를 갖는다. 전극이 복합 재료를 포함하는 복합 전극을 포함하고, 복합 재료가 황을 포함하는 일부 실시양태에서, 에너지 저장 장치는 약 16 Wh/kg 내지 약 25 Wh/kg, 약 16 Wh/kg 내지 약 50 Wh/kg, 약 16 Wh/kg 내지 약 100 Wh/kg, 약 16 Wh/kg 내지 약 200 Wh/kg, 약 16 Wh/kg 내지 약 300 Wh/kg, 약 16 Wh/kg 내지 약 400 Wh/kg, 약 16 Wh/kg 내지 약 500 Wh/kg, 약 16 Wh/kg 내지 약 600 Wh/kg, 약 16 Wh/kg 내지 약 750 Wh/kg, 약 25 Wh/kg 내지 약 50 Wh/kg, 약 25 Wh/kg 내지 약 100 Wh/kg, 약 25 Wh/kg 내지 약 200 Wh/kg, 약 25 Wh/kg 내지 약 300 Wh/kg, 약 25 Wh/kg 내지 약 400 Wh/kg, 약 25 Wh/kg 내지 약 500 Wh/kg, 약 25 Wh/kg 내지 약 600 Wh/kg, 약 25 Wh/kg 내지 약 750 Wh/kg, 약 50 Wh/kg 내지 약 100 Wh/kg, 약 50 Wh/kg 내지 약 200 Wh/kg, 약 50 Wh/kg 내지 약 300 Wh/kg, 약 50 Wh/kg 내지 약 400 Wh/kg, 약 50 Wh/kg 내지 약 500 Wh/kg, 약 50 Wh/kg 내지 약 600 Wh/kg, 약 50 Wh/kg 내지 약 750 Wh/kg, 약 100 Wh/kg 내지 약 200 Wh/kg, 약 100 Wh/kg 내지 약 300 Wh/kg, 약 100 Wh/kg 내지 약 400 Wh/kg, 약 100 Wh/kg 내지 약 500 Wh/kg, 약 100 Wh/kg 내지 약 600 Wh/kg, 약 100 Wh/kg 내지 약 750 Wh/kg, 약 200 Wh/kg 내지 약 300 Wh/kg, 약 200 Wh/kg 내지 약 400 Wh/kg, 약 200 Wh/kg 내지 약 500 Wh/kg, 약 200 Wh/kg 내지 약 600 Wh/kg, 약 200 Wh/kg 내지 약 750 Wh/kg, 약 300 Wh/kg 내지 약 400 Wh/kg, 약 300 Wh/kg 내지 약 500 Wh/kg, 약 300 Wh/kg 내지 약 600 Wh/kg, 약 300 Wh/kg 내지 약 750 Wh/kg, 약 400 Wh/kg 내지 약 500 Wh/kg, 약 400 Wh/kg 내지 약 600 Wh/kg, 약 400 Wh/kg 내지 약 750 Wh/kg, 약 500 Wh/kg 내지 약 600 Wh/kg, 약 500 Wh/kg 내지 약 750 Wh/kg, 또는 약 600 Wh/kg 내지 약 750 Wh/kg의 적층-비 에너지

밀도를 갖는다.

[0084] 전극이 복합 재료를 포함하는 복합 전극을 포함하고, 복합 재료가 황을 포함하는 일부 실시양태에서, 에너지 저장 장치는 약 0.5 kW/kg 내지 약 8 kW/kg의 적층-비 출력 밀도를 갖는다. 전극이 복합 재료를 포함하는 복합 전극을 포함하고, 복합 재료가 황을 포함하는 일부 실시양태에서, 에너지 저장 장치는 적어도 약 0.5 kW/kg의 적층-비 출력 밀도를 갖는다. 전극이 복합 재료를 포함하는 복합 전극을 포함하고, 복합 재료가 황을 포함하는 일부 실시양태에서, 에너지 저장 장치는 최대 약 8 kW/kg의 적층-비 출력 밀도를 갖는다. 전극이 복합 재료를 포함하는 복합 전극을 포함하고, 복합 재료가 황을 포함하는 일부 실시양태에서, 에너지 저장 장치는 약 0.5 kW/kg 내지 약 1 kW/kg, 약 0.5 kW/kg 내지 약 2 kW/kg, 약 0.5 kW/kg 내지 약 3 kW/kg, 약 0.5 kW/kg 내지 약 4 kW/kg, 약 0.5 kW/kg 내지 약 5 kW/kg, 약 0.5 kW/kg 내지 약 6 kW/kg, 약 0.5 kW/kg 내지 약 7 kW/kg, 약 0.5 kW/kg 내지 약 8 kW/kg, 약 1 kW/kg 내지 약 2 kW/kg, 약 1 kW/kg 내지 약 3 kW/kg, 약 1 kW/kg 내지 약 4 kW/kg, 약 1 kW/kg 내지 약 5 kW/kg, 약 1 kW/kg 내지 약 6 kW/kg, 약 1 kW/kg 내지 약 7 kW/kg, 약 1 kW/kg 내지 약 8 kW/kg, 약 2 kW/kg 내지 약 3 kW/kg, 약 2 kW/kg 내지 약 4 kW/kg, 약 2 kW/kg 내지 약 5 kW/kg, 약 2 kW/kg 내지 약 6 kW/kg, 약 2 kW/kg 내지 약 7 kW/kg, 약 2 kW/kg 내지 약 8 kW/kg, 약 3 kW/kg 내지 약 4 kW/kg, 약 3 kW/kg 내지 약 5 kW/kg, 약 3 kW/kg 내지 약 6 kW/kg, 약 3 kW/kg 내지 약 7 kW/kg, 약 3 kW/kg 내지 약 8 kW/kg, 약 4 kW/kg 내지 약 5 kW/kg, 약 4 kW/kg 내지 약 6 kW/kg, 약 4 kW/kg 내지 약 7 kW/kg, 약 4 kW/kg 내지 약 8 kW/kg, 약 5 kW/kg 내지 약 6 kW/kg, 약 5 kW/kg 내지 약 7 kW/kg, 약 5 kW/kg 내지 약 8 kW/kg, 약 6 kW/kg 내지 약 7 kW/kg, 약 6 kW/kg 내지 약 8 kW/kg, 또는 약 7 kW/kg 내지 약 8 kW/kg의 적층-비 출력 밀도를 갖는다.

[0085] 전극이 복합 재료를 포함하는 복합 전극을 포함하고, 복합 재료가 황을 포함하는 일부 실시양태에서, 에너지 저장 장치는 약 250 Wh/kg 내지 약 750 Wh/kg의 전극-비 중량측정 에너지 밀도를 갖는다. 전극이 복합 재료를 포함하는 복합 전극을 포함하고, 복합 재료가 황을 포함하는 일부 실시양태에서, 에너지 저장 장치는 적어도 약 250 Wh/kg의 전극-비 중량측정 에너지 밀도를 갖는다. 전극이 복합 재료를 포함하는 복합 전극을 포함하고, 복합 재료가 황을 포함하는 일부 실시양태에서, 에너지 저장 장치는 최대 약 750 Wh/kg의 전극-비 중량측정 에너지 밀도를 갖는다. 전극이 복합 재료를 포함하는 복합 전극을 포함하고, 복합 재료가 황을 포함하는 일부 실시양태에서, 에너지 저장 장치는 약 250 Wh/kg 내지 약 300 Wh/kg, 약 250 Wh/kg 내지 약 400 Wh/kg, 약 250 Wh/kg 내지 약 500 Wh/kg, 약 250 Wh/kg 내지 약 600 Wh/kg, 약 250 Wh/kg 내지 약 750 Wh/kg, 약 300 Wh/kg 내지 약 400 Wh/kg, 약 300 Wh/kg 내지 약 500 Wh/kg, 약 300 Wh/kg 내지 약 600 Wh/kg, 약 300 Wh/kg 내지 약 750 Wh/kg, 약 400 Wh/kg 내지 약 500 Wh/kg, 약 400 Wh/kg 내지 약 600 Wh/kg, 약 400 Wh/kg 내지 약 750 Wh/kg, 약 500 Wh/kg 내지 약 600 Wh/kg, 약 500 Wh/kg 내지 약 750 Wh/kg, 또는 약 600 Wh/kg 내지 약 750 Wh/kg의 전극-비 중량측정 에너지 밀도를 갖는다.

[0086] 전극이 복합 재료를 포함하는 복합 전극을 포함하고, 복합 재료가 황을 포함하는 일부 실시양태에서, 에너지 저장 장치는 약 0.5 kW/kg 내지 약 18 kW/kg의 전극-비 중량측정 출력 밀도를 갖는다. 전극이 복합 재료를 포함하는 복합 전극을 포함하고, 복합 재료가 황을 포함하는 일부 실시양태에서, 에너지 저장 장치는 적어도 약 0.5 kW/kg의 전극-비 중량측정 출력 밀도를 갖는다. 전극이 복합 재료를 포함하는 복합 전극을 포함하고, 복합 재료가 황을 포함하는 일부 실시양태에서, 에너지 저장 장치는 최대 약 18 kW/kg의 전극-비 중량측정 출력 밀도를 갖는다. 전극이 복합 재료를 포함하는 복합 전극을 포함하고, 복합 재료가 황을 포함하는 일부 실시양태에서, 에너지 저장 장치는 약 0.5 kW/kg 내지 약 1 kW/kg, 약 0.5 kW/kg 내지 약 2 kW/kg, 약 0.5 kW/kg 내지 약 4 kW/kg, 약 0.5 kW/kg 내지 약 6 kW/kg, 약 0.5 kW/kg 내지 약 8 kW/kg, 약 0.5 kW/kg 내지 약 12 kW/kg, 약 0.5 kW/kg 내지 약 14 kW/kg, 약 0.5 kW/kg 내지 약 16 kW/kg, 약 0.5 kW/kg 내지 약 18 kW/kg, 약 1 kW/kg 내지 약 2 kW/kg, 약 1 kW/kg 내지 약 4 kW/kg, 약 1 kW/kg 내지 약 6 kW/kg, 약 1 kW/kg 내지 약 8 kW/kg, 약 1 kW/kg 내지 약 12 kW/kg, 약 1 kW/kg 내지 약 14 kW/kg, 약 1 kW/kg 내지 약 16 kW/kg, 약 1 kW/kg 내지 약 18 kW/kg, 약 2 kW/kg 내지 약 4 kW/kg, 약 2 kW/kg 내지 약 6 kW/kg, 약 2 kW/kg 내지 약 8 kW/kg, 약 2 kW/kg 내지 약 12 kW/kg, 약 2 kW/kg 내지 약 14 kW/kg, 약 2 kW/kg 내지 약 16 kW/kg, 약 2 kW/kg 내지 약 18 kW/kg, 약 4 kW/kg 내지 약 6 kW/kg, 약 4 kW/kg 내지 약 8 kW/kg, 약 4 kW/kg 내지 약 12 kW/kg, 약 4 kW/kg 내지 약 14 kW/kg, 약 4 kW/kg 내지 약 16 kW/kg, 약 4 kW/kg 내지 약 18 kW/kg, 약 6 kW/kg 내지 약 8 kW/kg, 약 6 kW/kg 내지 약 12 kW/kg, 약 6 kW/kg 내지 약 14 kW/kg, 약 6 kW/kg 내지 약 16 kW/kg, 약 6 kW/kg 내지 약 18 kW/kg, 약 8 kW/kg 내지 약 12 kW/kg, 약 8 kW/kg 내지 약 14 kW/kg, 약 8 kW/kg 내지 약 16 kW/kg, 약 8 kW/kg 내지 약 18 kW/kg, 약 12 kW/kg 내지 약 14 kW/kg, 약 12 kW/kg 내지 약 16 kW/kg, 약 12 kW/kg 내지 약 18 kW/kg, 약 14 kW/kg 내지 약 16 kW/kg, 약 14 kW/kg 내지 약 18 kW/kg, 또는 약 16 kW/kg 내지 약 18

kW/kg의 전극-비 중량측정 출력 밀도를 갖는다.

[0087] 전극이 복합 재료를 포함하는 복합 전극을 포함하고, 복합 재료가 황을 포함하는 일부 실시양태에서, 에너지 저장 장치는 약 50 F 내지 약 1,000 F의 총 정전용량을 갖는다. 전극이 복합 재료를 포함하는 복합 전극을 포함하고, 복합 재료가 황을 포함하는 일부 실시양태에서, 에너지 저장 장치는 적어도 약 50 F의 총 정전용량을 갖는다. 전극이 복합 재료를 포함하는 복합 전극을 포함하고, 복합 재료가 황을 포함하는 일부 실시양태에서, 에너지 저장 장치는 최대 약 1,000 F의 총 정전용량을 갖는다. 전극이 복합 재료를 포함하는 복합 전극을 포함하고, 복합 재료가 황을 포함하는 일부 실시양태에서, 에너지 저장 장치는 약 50 F 내지 약 100 F, 약 50 F 내지 약 200 F, 약 50 F 내지 약 300 F, 약 50 F 내지 약 400 F, 약 50 F 내지 약 500 F, 약 50 F 내지 약 750 F, 약 50 F 내지 약 1,000 F, 약 100 F 내지 약 200 F, 약 100 F 내지 약 300 F, 약 100 F 내지 약 400 F, 약 100 F 내지 약 500 F, 약 100 F 내지 약 750 F, 약 100 F 내지 약 1,000 F, 약 200 F 내지 약 300 F, 약 200 F 내지 약 400 F, 약 200 F 내지 약 500 F, 약 200 F 내지 약 750 F, 약 200 F 내지 약 1,000 F, 약 300 F 내지 약 400 F, 약 300 F 내지 약 500 F, 약 300 F 내지 약 750 F, 약 300 F 내지 약 1,000 F, 약 400 F 내지 약 500 F, 약 400 F 내지 약 750 F, 약 400 F 내지 약 1,000 F, 약 500 F 내지 약 750 F, 약 500 F 내지 약 1,000 F, 또는 약 750 F 내지 약 1,000 F의 총 정전용량을 갖는다.

[0088] 일부 실시양태에서, 전극은 복합 재료를 포함하는 복합 전극을 포함하며, 여기서 복합 재료는 황 전이 금속 산화물을 포함한다.

[0089] 일부 실시양태에서 전이 금속 산화물은 하프늄(IV) 옥시드, 오스뮴 디옥시드, 팔라듐(II) 옥시드, 레늄(IV) 옥시드, 스트론튬 루테네이트, 스트론튬 티타네이트, 텅스텐 펜톡시드, 텅스텐 트리옥시드, 이트륨 바륨 구리 옥시드, 니오븀 펜톡시드 또는 그의 임의의 조합을 포함한다.

[0090] 전극이 복합 재료를 포함하는 복합 전극을 포함하고, 복합 재료가 전이 금속 산화물을 포함하는 일부 실시양태에서, 에너지 저장 장치는 약 8 Wh/kg 내지 약 90 Wh/kg의 적층-비 에너지 밀도를 갖는다. 전극이 복합 재료를 포함하는 복합 전극을 포함하고, 복합 재료가 전이 금속 산화물을 포함하는 일부 실시양태에서, 에너지 저장 장치는 적어도 약 8 Wh/kg의 적층-비 에너지 밀도를 갖는다. 전극이 복합 재료를 포함하는 복합 전극을 포함하고, 복합 재료가 전이 금속 산화물을 포함하는 일부 실시양태에서, 에너지 저장 장치는 최대 약 90 Wh/kg의 적층-비 에너지 밀도를 갖는다. 전극이 복합 재료를 포함하는 복합 전극을 포함하고, 복합 재료가 전이 금속 산화물을 포함하는 일부 실시양태에서, 에너지 저장 장치는 약 8 Wh/kg 내지 약 10 Wh/kg, 약 8 Wh/kg 내지 약 20 Wh/kg, 약 8 Wh/kg 내지 약 30 Wh/kg, 약 8 Wh/kg 내지 약 40 Wh/kg, 약 8 Wh/kg 내지 약 50 Wh/kg, 약 8 Wh/kg 내지 약 60 Wh/kg, 약 8 Wh/kg 내지 약 70 Wh/kg, 약 8 Wh/kg 내지 약 80 Wh/kg, 약 8 Wh/kg 내지 약 90 Wh/kg, 약 10 Wh/kg 내지 약 20 Wh/kg, 약 10 Wh/kg 내지 약 30 Wh/kg, 약 10 Wh/kg 내지 약 40 Wh/kg, 약 10 Wh/kg 내지 약 50 Wh/kg, 약 10 Wh/kg 내지 약 60 Wh/kg, 약 10 Wh/kg 내지 약 70 Wh/kg, 약 10 Wh/kg 내지 약 80 Wh/kg, 약 10 Wh/kg 내지 약 90 Wh/kg, 약 20 Wh/kg 내지 약 30 Wh/kg, 약 20 Wh/kg 내지 약 40 Wh/kg, 약 20 Wh/kg 내지 약 50 Wh/kg, 약 20 Wh/kg 내지 약 60 Wh/kg, 약 20 Wh/kg 내지 약 70 Wh/kg, 약 20 Wh/kg 내지 약 80 Wh/kg, 약 20 Wh/kg 내지 약 90 Wh/kg, 약 30 Wh/kg 내지 약 40 Wh/kg, 약 30 Wh/kg 내지 약 50 Wh/kg, 약 30 Wh/kg 내지 약 60 Wh/kg, 약 30 Wh/kg 내지 약 70 Wh/kg, 약 30 Wh/kg 내지 약 80 Wh/kg, 약 30 Wh/kg 내지 약 90 Wh/kg, 약 40 Wh/kg 내지 약 50 Wh/kg, 약 40 Wh/kg 내지 약 60 Wh/kg, 약 40 Wh/kg 내지 약 70 Wh/kg, 약 40 Wh/kg 내지 약 80 Wh/kg, 약 40 Wh/kg 내지 약 90 Wh/kg, 약 50 Wh/kg 내지 약 60 Wh/kg, 약 50 Wh/kg 내지 약 70 Wh/kg, 약 50 Wh/kg 내지 약 80 Wh/kg, 약 50 Wh/kg 내지 약 90 Wh/kg, 약 60 Wh/kg 내지 약 70 Wh/kg, 약 60 Wh/kg 내지 약 80 Wh/kg, 약 60 Wh/kg 내지 약 90 Wh/kg, 약 70 Wh/kg 내지 약 80 Wh/kg, 약 70 Wh/kg 내지 약 90 Wh/kg, 또는 약 80 Wh/kg 내지 약 90 Wh/kg의 적층-비 에너지 밀도를 갖는다.

[0091] 전극이 복합 재료를 포함하는 복합 전극을 포함하고, 복합 재료가 전이 금속 산화물을 포함하는 일부 실시양태에서, 에너지 저장 장치는 약 0.5 kW/kg 내지 약 20 kW/kg의 전극-비 중량측정 출력 밀도를 갖는다. 전극이 복합 재료를 포함하는 복합 전극을 포함하고, 복합 재료가 전이 금속 산화물을 포함하는 일부 실시양태에서, 에너지 저장 장치는 적어도 약 0.5 kW/kg의 전극-비 중량측정 출력 밀도를 갖는다. 전극이 복합 재료를 포함하는 복합 전극을 포함하고, 복합 재료가 전이 금속 산화물을 포함하는 일부 실시양태에서, 에너지 저장 장치는 최대 약 20 kW/kg의 전극-비 중량측정 출력 밀도를 갖는다. 전극이 복합 재료를 포함하는 복합 전극을 포함하고, 복합 재료가 전이 금속 산화물을 포함하는 일부 실시양태에서, 에너지 저장 장치는 약 0.5 kW/kg 내지 약 1 kW/kg, 약 0.5 kW/kg 내지 약 5 kW/kg, 약 0.5 kW/kg 내지 약 10 kW/kg, 약 0.5 kW/kg 내지 약 15 kW/kg, 약 0.5 kW/kg 내지 약 20 kW/kg, 약 1 kW/kg 내지 약 5 kW/kg, 약 1 kW/kg 내지 약 10 kW/kg, 약 1 kW/kg 내지 약 15 kW/kg, 약 1 kW/kg 내지 약 20 kW/kg, 약 5 kW/kg 내지 약 10 kW/kg, 약 5 kW/kg 내지 약 15 kW/kg, 약 5

kW/kg 내지 약 20 kW/kg, 약 10 kW/kg 내지 약 15 kW/kg, 약 10 kW/kg 내지 약 20 kW/kg, 또는 약 15 kW/kg 내지 약 20 kW/kg의 전극-비 중량측정 출력 밀도를 갖는다.

[0092] 전극이 복합 재료를 포함하는 복합 전극을 포함하고, 복합 재료가 전이 금속 산화물을 포함하는 일부 실시양태에서, 에너지 저장 장치는 약 20 Wh/kg 내지 약 280 Wh/kg의 적층-비 에너지 밀도를 갖는다. 전극이 복합 재료를 포함하는 복합 전극을 포함하고, 복합 재료가 전이 금속 산화물을 포함하는 일부 실시양태에서, 에너지 저장 장치는 적어도 약 20 Wh/kg의 적층-비 에너지 밀도를 갖는다. 전극이 복합 재료를 포함하는 복합 전극을 포함하고, 복합 재료가 전이 금속 산화물을 포함하는 일부 실시양태에서, 에너지 저장 장치는 최대 약 280 Wh/kg의 적층-비 에너지 밀도를 갖는다. 전극이 복합 재료를 포함하는 복합 전극을 포함하고, 복합 재료가 전이 금속 산화물을 포함하는 일부 실시양태에서, 에너지 저장 장치는 약 20 Wh/kg 내지 약 40 Wh/kg, 약 20 Wh/kg 내지 약 60 Wh/kg, 약 20 Wh/kg 내지 약 80 Wh/kg, 약 20 Wh/kg 내지 약 100 Wh/kg, 약 20 Wh/kg 내지 약 140 Wh/kg, 약 20 Wh/kg 내지 약 180 Wh/kg, 약 20 Wh/kg 내지 약 220 Wh/kg, 약 20 Wh/kg 내지 약 280 Wh/kg, 약 40 Wh/kg 내지 약 60 Wh/kg, 약 40 Wh/kg 내지 약 80 Wh/kg, 약 40 Wh/kg 내지 약 100 Wh/kg, 약 40 Wh/kg 내지 약 140 Wh/kg, 약 40 Wh/kg 내지 약 180 Wh/kg, 약 40 Wh/kg 내지 약 220 Wh/kg, 약 40 Wh/kg 내지 약 280 Wh/kg, 약 60 Wh/kg 내지 약 80 Wh/kg, 약 60 Wh/kg 내지 약 100 Wh/kg, 약 60 Wh/kg 내지 약 140 Wh/kg, 약 60 Wh/kg 내지 약 180 Wh/kg, 약 60 Wh/kg 내지 약 220 Wh/kg, 약 60 Wh/kg 내지 약 280 Wh/kg, 약 80 Wh/kg 내지 약 100 Wh/kg, 약 80 Wh/kg 내지 약 140 Wh/kg, 약 80 Wh/kg 내지 약 180 Wh/kg, 약 80 Wh/kg 내지 약 220 Wh/kg, 약 80 Wh/kg 내지 약 280 Wh/kg, 약 100 Wh/kg 내지 약 140 Wh/kg, 약 100 Wh/kg 내지 약 180 Wh/kg, 약 100 Wh/kg 내지 약 220 Wh/kg, 약 100 Wh/kg 내지 약 280 Wh/kg, 약 140 Wh/kg 내지 약 180 Wh/kg, 약 140 Wh/kg 내지 약 220 Wh/kg, 약 140 Wh/kg 내지 약 280 Wh/kg, 약 180 Wh/kg 내지 약 220 Wh/kg, 약 180 Wh/kg 내지 약 280 Wh/kg, 또는 약 220 Wh/kg 내지 약 280 Wh/kg의 적층-비 에너지 밀도를 갖는다.

[0093] 전극이 복합 재료를 포함하는 복합 전극을 포함하고, 복합 재료가 전이 금속 산화물을 포함하는 일부 실시양태에서, 에너지 저장 장치는 약 1.5 kW/kg 내지 약 40 kW/kg의 전극-비 중량측정 출력 밀도를 갖는다. 전극이 복합 재료를 포함하는 복합 전극을 포함하고, 복합 재료가 전이 금속 산화물을 포함하는 일부 실시양태에서, 에너지 저장 장치는 적어도 약 1.5 kW/kg의 전극-비 중량측정 출력 밀도를 갖는다. 전극이 복합 재료를 포함하는 복합 전극을 포함하고, 복합 재료가 전이 금속 산화물을 포함하는 일부 실시양태에서, 에너지 저장 장치는 최대 약 40 kW/kg의 전극-비 중량측정 출력 밀도를 갖는다. 전극이 복합 재료를 포함하는 복합 전극을 포함하고, 복합 재료가 전이 금속 산화물을 포함하는 일부 실시양태에서, 에너지 저장 장치는 약 1.5 kW/kg 내지 약 3 kW/kg, 약 1.5 kW/kg 내지 약 5 kW/kg, 약 1.5 kW/kg 내지 약 10 kW/kg, 약 1.5 kW/kg 내지 약 20 kW/kg, 약 1.5 kW/kg 내지 약 30 kW/kg, 약 1.5 kW/kg 내지 약 40 kW/kg, 약 3 kW/kg 내지 약 5 kW/kg, 약 3 kW/kg 내지 약 10 kW/kg, 약 3 kW/kg 내지 약 20 kW/kg, 약 3 kW/kg 내지 약 30 kW/kg, 약 3 kW/kg 내지 약 40 kW/kg, 약 5 kW/kg 내지 약 10 kW/kg, 약 5 kW/kg 내지 약 20 kW/kg, 약 5 kW/kg 내지 약 30 kW/kg, 약 5 kW/kg 내지 약 40 kW/kg, 약 10 kW/kg 내지 약 20 kW/kg, 약 10 kW/kg 내지 약 30 kW/kg, 약 10 kW/kg 내지 약 40 kW/kg, 약 20 kW/kg 내지 약 30 kW/kg, 약 20 kW/kg 내지 약 40 kW/kg, 또는 약 30 kW/kg 내지 약 40 kW/kg의 전극-비 중량측정 출력 밀도를 갖는다.

[0094] 전극이 복합 재료를 포함하는 복합 전극을 포함하고, 복합 재료가 전이 금속 산화물을 포함하는 일부 실시양태에서, 에너지 저장 장치는 약 50 F 내지 약 1,000 F의 총 정전용량을 갖는다. 전극이 복합 재료를 포함하는 복합 전극을 포함하고, 복합 재료가 전이 금속 산화물을 포함하는 일부 실시양태에서, 에너지 저장 장치는 적어도 약 50 F의 총 정전용량을 갖는다. 전극이 복합 재료를 포함하는 복합 전극을 포함하고, 복합 재료가 전이 금속 산화물을 포함하는 일부 실시양태에서, 에너지 저장 장치는 최대 약 1,000 F의 총 정전용량을 갖는다. 전극이 복합 재료를 포함하는 복합 전극을 포함하고, 복합 재료가 전이 금속 산화물을 포함하는 일부 실시양태에서, 에너지 저장 장치는 약 50 F 내지 약 100 F, 약 50 F 내지 약 200 F, 약 50 F 내지 약 300 F, 약 50 F 내지 약 400 F, 약 50 F 내지 약 500 F, 약 50 F 내지 약 750 F, 약 50 F 내지 약 1,000 F, 약 100 F 내지 약 200 F, 약 100 F 내지 약 300 F, 약 100 F 내지 약 400 F, 약 100 F 내지 약 500 F, 약 100 F 내지 약 750 F, 약 100 F 내지 약 1,000 F, 약 200 F 내지 약 300 F, 약 200 F 내지 약 400 F, 약 200 F 내지 약 500 F, 약 200 F 내지 약 750 F, 약 200 F 내지 약 1,000 F, 약 300 F 내지 약 400 F, 약 300 F 내지 약 500 F, 약 300 F 내지 약 750 F, 약 300 F 내지 약 1,000 F, 약 400 F 내지 약 500 F, 약 400 F 내지 약 750 F, 약 400 F 내지 약 1,000 F, 약 500 F 내지 약 750 F, 약 500 F 내지 약 1,000 F, 또는 약 750 F 내지 약 1,000 F의 총 정전용량을 갖는다.

[0095] 일부 실시양태에서, 제1 전극 및 제2 전극은 복합 전극을 포함하고, 여기서 제1 전극의 복합 재료는 규소를 포

함하고, 여기서 제2 전극의 복합 재료는 황을 포함한다.

[0096] 제1 전극 및 제2 전극이 복합 전극을 포함하고, 제1 전극의 복합 재료가 규소를 포함하고, 제2 전극의 복합 재료가 황을 포함하는 일부 실시양태에서, 에너지 저장 장치는 약 75 Wh/kg 내지 약 900 Wh/kg의 적층-비 에너지 밀도를 갖는다. 제1 전극 및 제2 전극이 복합 전극을 포함하고, 제1 전극의 복합 재료가 규소를 포함하고, 제2 전극의 복합 재료가 황을 포함하는 일부 실시양태에서, 에너지 저장 장치는 적어도 약 75 Wh/kg의 적층-비 에너지 밀도를 갖는다. 제1 전극 및 제2 전극이 복합 전극을 포함하고, 제1 전극의 복합 재료가 규소를 포함하고, 제2 전극의 복합 재료가 황을 포함하는 일부 실시양태에서, 에너지 저장 장치는 최대 약 900 Wh/kg의 적층-비 에너지 밀도를 갖는다. 제1 전극 및 제2 전극이 복합 전극을 포함하고, 제1 전극의 복합 재료가 규소를 포함하고, 제2 전극의 복합 재료가 황을 포함하는 일부 실시양태에서, 에너지 저장 장치는 약 75 Wh/kg 내지 약 100 Wh/kg, 약 75 Wh/kg 내지 약 200 Wh/kg, 약 75 Wh/kg 내지 약 300 Wh/kg, 약 75 Wh/kg 내지 약 400 Wh/kg, 약 75 Wh/kg 내지 약 500 Wh/kg, 약 75 Wh/kg 내지 약 600 Wh/kg, 약 75 Wh/kg 내지 약 700 Wh/kg, 약 75 Wh/kg 내지 약 800 Wh/kg, 약 75 Wh/kg 내지 약 900 Wh/kg, 약 100 Wh/kg 내지 약 200 Wh/kg, 약 100 Wh/kg 내지 약 300 Wh/kg, 약 100 Wh/kg 내지 약 400 Wh/kg, 약 100 Wh/kg 내지 약 500 Wh/kg, 약 100 Wh/kg 내지 약 600 Wh/kg, 약 100 Wh/kg 내지 약 700 Wh/kg, 약 100 Wh/kg 내지 약 800 Wh/kg, 약 100 Wh/kg 내지 약 900 Wh/kg, 약 200 Wh/kg 내지 약 300 Wh/kg, 약 200 Wh/kg 내지 약 400 Wh/kg, 약 200 Wh/kg 내지 약 500 Wh/kg, 약 200 Wh/kg 내지 약 600 Wh/kg, 약 200 Wh/kg 내지 약 700 Wh/kg, 약 200 Wh/kg 내지 약 800 Wh/kg, 약 200 Wh/kg 내지 약 900 Wh/kg, 약 300 Wh/kg 내지 약 400 Wh/kg, 약 300 Wh/kg 내지 약 500 Wh/kg, 약 300 Wh/kg 내지 약 600 Wh/kg, 약 300 Wh/kg 내지 약 700 Wh/kg, 약 300 Wh/kg 내지 약 800 Wh/kg, 약 300 Wh/kg 내지 약 900 Wh/kg, 약 400 Wh/kg 내지 약 500 Wh/kg, 약 400 Wh/kg 내지 약 600 Wh/kg, 약 400 Wh/kg 내지 약 700 Wh/kg, 약 400 Wh/kg 내지 약 800 Wh/kg, 약 400 Wh/kg 내지 약 900 Wh/kg, 약 500 Wh/kg 내지 약 600 Wh/kg, 약 500 Wh/kg 내지 약 700 Wh/kg, 약 500 Wh/kg 내지 약 800 Wh/kg, 약 500 Wh/kg 내지 약 900 Wh/kg, 약 600 Wh/kg 내지 약 700 Wh/kg, 약 600 Wh/kg 내지 약 800 Wh/kg, 약 600 Wh/kg 내지 약 900 Wh/kg, 약 700 Wh/kg 내지 약 800 Wh/kg, 약 700 Wh/kg 내지 약 900 Wh/kg, 또는 약 800 Wh/kg 내지 약 900 Wh/kg의 적층-비 에너지 밀도를 갖는다.

[0097] 본원에 기재된 제3 실시양태는 전극을 구성하는 방법이며, 그래핀 옥시드 및 제1 용매의 용액을 형성하는 것; 용액을 가열하여 구멍이 많은 그래핀 옥시드를 형성하는 것; 용액 중의 구멍이 많은 그래핀 옥시드를 원심분리하는 것; 제2 용매에서 구멍이 많은 그래핀 옥시드를 세척하는 것; 제3 용매 중에 구멍이 많은 그래핀 옥시드의 분산액을 형성하는 것; 및 분산액에 산을 첨가하여 구멍이 많은 그래핀 옥시드 프레임워크를 형성하는 것을 포함한다.

[0098] 일부 실시양태에서, 방법은 롤-투-롤 (roll-to-roll) 공정에서 전극을 형성할 수 있다. 일부 실시양태에서, 방법은 롤-투-롤 공정에서 전극을 연속적으로 형성할 수 있다.

[0099] 일부 실시양태에서, 용액 중 그래핀 옥시드의 농도는 약 1.2 g/L 내지 약 5 g/L이다. 일부 실시양태에서, 용액 중 그래핀 옥시드의 농도는 적어도 약 1.2 g/L이다. 일부 실시양태에서, 용액의 그래핀 옥시드의 농도는 최대 약 5 g/L이다. 일부 실시양태에서, 용액 중 그래핀 옥시드의 농도는 약 1.2 g/L 내지 약 1.5 g/L, 약 1.2 g/L 내지 약 1.75 g/L, 약 1.2 g/L 내지 약 2 g/L, 약 1.2 g/L 내지 약 2.5 g/L, 약 1.2 g/L 내지 약 3 g/L, 약 1.2 g/L 내지 약 3.5 g/L, 약 1.2 g/L 내지 약 4 g/L, 약 1.2 g/L 내지 약 5 g/L, 약 1.5 g/L 내지 약 1.75 g/L, 약 1.5 g/L 내지 약 2 g/L, 약 1.5 g/L 내지 약 2.5 g/L, 약 1.5 g/L 내지 약 3 g/L, 약 1.5 g/L 내지 약 3.5 g/L, 약 1.5 g/L 내지 약 4 g/L, 약 1.5 g/L 내지 약 5 g/L, 약 1.75 g/L 내지 약 2 g/L, 약 1.75 g/L 내지 약 2.5 g/L, 약 1.75 g/L 내지 약 3 g/L, 약 1.75 g/L 내지 약 3.5 g/L, 약 1.75 g/L 내지 약 4 g/L, 약 1.75 g/L 내지 약 5 g/L, 약 2 g/L 내지 약 2.5 g/L, 약 2 g/L 내지 약 3 g/L, 약 2 g/L 내지 약 3.5 g/L, 약 2 g/L 내지 약 4 g/L, 약 2 g/L 내지 약 5 g/L, 약 2.5 g/L 내지 약 3 g/L, 약 2.5 g/L 내지 약 3.5 g/L, 약 2.5 g/L 내지 약 4 g/L, 약 2.5 g/L 내지 약 5 g/L, 약 3 g/L 내지 약 3.5 g/L, 약 3 g/L 내지 약 4 g/L, 약 3 g/L 내지 약 5 g/L, 약 3.5 g/L 내지 약 4 g/L, 약 3.5 g/L 내지 약 5 g/L, 또는 약 4 g/L 내지 약 5 g/L이다.

[0100] 일부 실시양태에서, 제1 용매는 산소, 오존, 과산화수소, 플루오라이트 디옥시드, 리튬 퍼옥시드, 바륨 퍼옥시드, 플루오린, 염소, 질산, 니트레이트 화합물, 황산, 퍼옥시이황산, 퍼옥시일황산, 클로라이트, 클로레이트, 퍼클로레이트, 할로겐 화합물 하이포클로라이트, 하이포할라이트 화합물, 가정용 표백제, 6가 크로뮴 화합물, 크로뮴산, 디크로뮴산, 삼산화크로뮴, 피리디늄 클로로크로메이트, 크로메이트 화합물, 디크로메이트 화합물, 퍼망가네이트 화합물, 과망가니즈산칼륨, 과붕산나트륨, 아산화질소, 질산칼륨, 비스무트산나트륨 또는 그의 임

의의 조합을 포함하는 산화제를 포함한다.

[0101] 일부 실시양태에서, 용액은 약 50℃ 내지 약 200℃의 온도로 가열된다. 일부 실시양태에서, 용액은 적어도 약 50℃의 온도로 가열된다. 일부 실시양태에서, 용액은 최대 약 200℃의 온도로 가열된다. 일부 실시양태에서, 용액은 약 50℃ 내지 약 75℃, 약 50℃ 내지 약 100℃, 약 50℃ 내지 약 125℃, 약 50℃ 내지 약 150℃, 약 50℃ 내지 약 175℃, 약 50℃ 내지 약 200℃, 약 75℃ 내지 약 100℃, 약 75℃ 내지 약 125℃, 약 75℃ 내지 약 150℃, 약 75℃ 내지 약 175℃, 약 75℃ 내지 약 200℃, 약 100℃ 내지 약 125℃, 약 100℃ 내지 약 150℃, 약 100℃ 내지 약 175℃, 약 100℃ 내지 약 200℃, 약 125℃ 내지 약 150℃, 약 125℃ 내지 약 175℃, 약 125℃ 내지 약 200℃, 약 150℃ 내지 약 175℃, 약 150℃ 내지 약 200℃, 또는 약 175℃ 내지 약 200℃의 온도로 가열된다.

[0102] 일부 실시양태에서, 용액이 가열되는 시간 주기는 약 12시간 내지 약 48시간이다. 일부 실시양태에서, 용액이 가열되는 시간 주기는 적어도 약 12시간이다. 일부 실시양태에서, 용액이 가열되는 시간 주기는 최대 약 48시간 있다. 일부 실시양태에서, 용액이 가열되는 시간 주기는 약 12시간 내지 약 18시간, 약 12시간 내지 약 24시간, 약 12시간 내지 약 30시간, 약 12시간 내지 약 36시간, 약 12시간 내지 약 42시간, 약 12시간 내지 약 48시간, 약 18시간 내지 약 24시간, 약 18시간 내지 약 30시간, 약 18시간 내지 약 36시간, 약 18시간 내지 약 42시간, 약 18시간 내지 약 48시간, 약 24시간 내지 약 30시간, 약 24시간 내지 약 36시간, 약 24시간 내지 약 42시간, 약 24시간 내지 약 48시간, 약 30시간 내지 약 36시간, 약 30시간 내지 약 42시간, 약 30시간 내지 약 48시간, 약 36시간 내지 약 42시간, 약 36시간 내지 약 48시간, 또는 약 42시간 내지 약 48시간이다.

[0103] 일부 실시양태에서, 제2 용매 및 제3 용매 중 적어도 1개는 포름산, n-부탄올, 이소프로판올, n-프로판올, 에탄올, 메탄올, 아세트산, 물 또는 그의 임의의 조합을 포함한다.

[0104] 일부 실시양태에서, 산은 약산을 포함한다. 일부 실시양태에서, 약산은 포름산 아세트산, 아세트산, 트리클로로아세트산, 플루오린화수소산, 시안화수소산, 황화수소 또는 그의 임의의 조합을 포함한다.

[0105] 일부 실시양태는 스틸, 스테인리스 니켈, 알루미늄, 구리, 비스무트, 크로뮴, 코발트, 갈륨, 금, 철, 인듐, 납, 마그네슘, 수은, 은, 나트륨, 주석, 티타늄, 아연, 지르코늄, 브론즈 또는 그의 임의의 조합을 포함하는 금속성 발포체 상에 구멍이 많은 그래핀 옥시드 프레임워크를 압축하는 것을 추가로 포함한다.

[0106] 일부 실시양태는 다음을 포함하는 집전체 상에 구멍이 많은 그래핀 옥시드 프레임워크를 배치하는 것을 추가로 포함한다: 은, 구리, 금, 알루미늄, 칼슘, 텅스텐, 아연, 텅스텐, 황동, 브론즈, 니켈, 리튬, 철, 백금, 주석, 탄소강, 납, 티타늄, 스테인레스 스틸, 수은, 크로뮴, 비소화갈륨 또는 그의 임의의 조합을 포함하는 금속 필름; 또는 폴리플루오렌, 폴리페닐렌, 폴리피렌, 폴리아줄렌, 폴리나프탈렌, 폴리아세틸렌, 폴리 p-페닐렌 비닐렌, 폴리피롤, 폴리카르바졸, 폴리인돌, 폴리아제피넴, 폴리아닐린, 폴리티오펜, 폴리 3,4-에틸렌디옥시티오펜, 폴리 p-페닐렌 술피드, 폴리아세틸렌, 폴리 p-페닐렌 비닐렌 또는 그의 임의의 조합을 포함하는 중합체 필름.

[0107] 일부 실시양태에서, 제1 용매는 산화제를 포함하며, 여기서 산화제는 산소, 오존, 과산화수소, 플루오라이트 디옥시드, 리튬 퍼옥시드, 바륨 퍼옥시드, 플루오린, 염소, 질산, 니트레이트 화합물, 황산, 퍼옥시이황산, 퍼옥시일황산, 클로라이트, 클로레이트, 퍼클로레이트, 할로겐 화합물 하이포클로라이트, 하이포할라이트 화합물, 가정용 표백제, 6가 크로뮴 화합물, 크로뮴산, 디크로뮴산, 삼산화크로뮴, 피리디늄 클로로크로메이트, 크로메이트 화합물, 디크로메이트 화합물, 퍼망가네이트 화합물, 과망가니즈산칼륨, 과붕산나트륨, 아산화질소, 질산칼륨, 비스무트산나트륨 또는 그의 임의의 조합을 포함한다.

[0108] 일부 실시양태에서, 제2 용매는 포름산, n-부탄올, 이소프로판올, n-프로판올, 에탄올, 메탄올, 아세트산, 물 또는 그의 임의의 조합을 포함한다.

[0109] 일부 실시양태에서, 제3 용매는 포름산, n-부탄올, 이소프로판올, n-프로판올, 에탄올, 메탄올, 아세트산, 물 또는 그의 임의의 조합을 포함한다.

[0110] 일부 실시양태에서, 산은 약산을 포함한다. 일부 실시양태에서, 약산은 포름산 아세트산, 아세트산, 트리클로로아세트산, 플루오린화수소산, 시안화수소산, 황화수소 또는 그의 임의의 조합을 포함한다.

[0111] 일부 실시양태는 분산액을 용기에 넣는 것을 추가로 포함한다.

[0112] 일부 실시양태는 발포체 상에 구멍이 많은 그래핀 옥시드 프레임워크를 압축하는 것을 추가로 포함하며, 발포체는 스틸, 스테인리스 니켈, 알루미늄, 구리, 비스무트, 크로뮴, 코발트, 갈륨, 금, 철, 인듐, 납, 마그네슘, 수

은, 은, 나트륨, 주석, 티타늄, 아연, 지르코늄, 브론즈 또는 그의 임의의 조합을 포함하는 금속성 발포체이다.

[0113] 일부 실시양태는 집전체 상에 구멍이 많은 그래핀 옥시드 프레임워크를 배치하는 것을 추가로 포함한다.

[0114] 일부 실시양태에서, 집전체는 금속 필름 또는 중합체 필름 또는 그의 임의의 조합을 포함하며, 여기서 금속성 필름은 은, 구리, 금, 알루미늄, 칼슘, 텅스텐, 아연, 텅스텐, 황동, 브론즈, 니켈, 리튬, 철, 백금, 주석, 탄소강, 납, 티타늄, 스테인레스 스틸, 수은, 크로뮴, 비소화갈륨 또는 그의 임의의 조합을 포함하는 금속 필름을 포함한다.

[0115] 일부 실시양태에서, 집전체는 중합체 필름을 포함하며, 여기서 중합체 필름은 폴리플루오렌, 폴리페닐렌, 폴리피렌, 폴리아줄렌, 폴리나프탈렌, 폴리아세틸렌, 폴리 p-페닐렌 비닐렌, 폴리피롤, 폴리카르바졸, 폴리인돌, 폴리아제피넴, 폴리아닐린, 폴리티오펜, 폴리 3,4-에틸렌디옥시티오펜, 폴리 p-페닐렌 술피드, 폴리아세틸렌, 폴리 p-페닐렌 비닐렌 또는 그의 임의의 조합을 포함한다.

[0116] 본원에 제공된 제4 측면은, 초-고 황 함량을 갖는 3차원 그래핀 프레임워크를 갖는 전극을 구성하는 방법이며, 방법은 그래핀 옥시드 현탁액을 형성하는 것 및 현탁액을 건조시키는 것을 포함하는 그래핀 옥시드의 합성; 및 황 전구체를 그래핀 옥시드 현탁액 및 제1 용매에 첨가하는 것; 제1 산을 제1 용액에 첨가하는 것, 제1 용액을 교반하는 것, 제2 산을 제1 용액에 첨가하여 제2 용액을 형성하는 것, 제2 용액을 가열하는 것, 제2 용매에서 제2 용액을 세척하는 것, 제2 용액을 동결건조하는 것을 포함하는 복합 황-그래핀 옥시드의 합성을 포함한다.

[0117] 일부 실시양태에서, 황 전구체는 소듐 티오술페이트, 알칼리성 소듐 티오술페이트, 암모늄 티오술페이트, 바륨 티오술페이트, 칼슘 티오술페이트, 금(I) 소듐 티오술페이트 탈수화물, 칼륨 티오술페이트, 술페이트 또는 그의 임의의 조합을 포함한다.

[0118] 일부 실시양태에서, 술페이트는 암모늄 알루미늄 술페이트 히드록시드, 암모늄 철 술페이트 히드록시드, 바륨 알루미늄 술페이트 옥시드 히드록시드, 바륨 크로메이트 술페이트, 황산바륨, 뷰던타이트 납 철 아르세네이트 술페이트 히드록시드, 칼슘 알루미늄 아르세네이트 술페이트 히드록시드, 칼슘 알루미늄 술페이트 옥시드 히드록시드, 황산칼슘, 구리 철 알루미늄 술페이트 히드록시드, 구리 납 카르보네이트 술페이트 히드록시드, 황산구리 히드록시드, 수화된 알루미늄 술페이트 히드록시드, 수화된 칼슘 알루미늄 규소 히드로보레이트 술페이트 히드록시드, 수화된 칼슘 알루미늄 술페이트 플루오라이드 히드록시드, 수화된 칼슘 알루미늄 술페이트 히드록시드, 수화된 칼슘 카르보네이트 술페이트, 수화된 칼슘 구리 술페이트 히드록시드, 수화된 칼슘 구리 아연 술페이트 히드록시드, 수화된 칼슘 철 알루미늄 망가니즈 술페이트 테트라히드로옥소보레이트 히드록시드, 수화된 칼슘 마그네슘 카르보네이트 술페이트 클로라이드 히드록시드, 수화된 칼슘 망가니즈 카르보네이트 술페이트 히드록시드, 수화된 칼슘 망가니즈 술페이트 히드록시드, 수화된 칼슘 규소 카르보네이트 술페이트 히드록시드, 수화된 황산칼슘, 수화된 코발트 마그네슘 니켈 알루미늄 술페이트, 수화된 코발트 망가니즈 니켈 술페이트, 수화된 코발트 술페이트, 수화된 구리 알루미늄 술페이트 히드록시드 클로라이드, 수화된 구리 알루미늄 술페이트 히드록시드, 수화된 구리 알루미늄 술페이트 히드록시드, 수화된 구리 카르보네이트 술페이트 히드록시드, 수화된 구리 철 아연 술페이트, 수화된 황산구리 히드록시드 클로라이드, 수화된 황산구리 히드록시드, 수화된 황산구리, 수화된 황산구리, 수화된 구리 우라닐 술페이트 히드록시드, 수화된 구리 아연 술페이트 히드록시드, 수화된 수소 칼슘 알루미늄 아르세네이트 술페이트 히드록시드, 수화된 철 알루미늄 술페이트, 수화된 철 마그네슘 니켈 크로뮴 알루미늄 술페이트, 수화된 철 마그네슘 술페이트 히드록시드, 수화된 황산철 히드록시드, 수화된 황산철 히드록시드, 수화된 황산철, 수화된 황산철, 수화된 황산철, 수화된 황산철, 수화된 황산철, 수화된 마그네슘 알루미늄 술페이트, 수화된 마그네슘 철 술페이트 히드록시드, 수화된 마그네슘 망가니즈 아연 술페이트 히드록시드, 수화된 마그네슘 니켈 철 크로뮴 알루미늄 카르보네이트 술페이트 히드록시드, 수화된 황산마그네슘, 수화된 황산마그네슘, 수화된 황산마그네슘, 수화된 황산마그네슘, 수화된 황산마그네슘, 수화된 마그네슘 아연 망가니즈 술페이트 히드록시드, 수화된 망가니즈 알루미늄 술페이트, 수화된 황산망가니즈, 수화된 황산망가니즈, 수화된 황산망가니즈, 수화된 망가니즈 아연 철 술페이트, 수화된 니켈 철 술페이트, 수화된 니켈 술페이트, 수화된 니켈 술페이트, 수화된 칼륨 알루미늄 술페이트, 수화된 칼륨 칼슘 마그네슘 술페이트, 수화된 칼륨 철 술페이트, 수화된 칼륨 마그네슘 술페이트, 수화된 칼륨 소듐 철 니트레이트 술페이트, 수화된 칼륨 소듐 마그네슘 니트레이트 술페이트, 수화된 칼륨 우라닐 술페이트 히드록시드, 수화된 소듐 칼슘 마그네슘 아연 알루미늄 실리케이트 술페이트 히드록시드, 수화된 소듐 마그네슘 술페이트, 수화된 황산나트륨, 수화된 우라닐 술페이트 히드록시드, 수화된 아연 구리 철 술페이트, 수화된 아연 철 망가니즈 알루미늄 술페이트, 수화된 아연 마그네슘 술페이트, 수화된 아연 망가니즈 술페이트, 수화된 황산아연, 히드로늄 철 술페이트 히드록시드, 납 알루미늄 아르세네이트 술페이트 히드록시드, 납 알루미늄 포스페이트 술페이트 히드록시드, 납 구리 알

루미늄 술페이트 히드록시드, 납 구리 철 알루미늄 술페이트 히드록시드, 납 구리 술페이트 히드록시드, 납 구리 술페이트 실리케이트 히드록시드, 납 갈륨 아르세네이트 술페이트 히드록시드, 납 철 포스페이트 술페이트 히드록시드, 납 철 술페이트 히드록시드, 납 철 술페이트 히드록시드, 납 스트론튬 알루미늄 포스페이트 술페이트 히드록시드, 황산납, 황산납, 마그네슘 망가니즈 아연 철 카르보네이트 술페이트 히드록시드, 칼륨 알루미늄 술페이트 히드록시드, 칼륨 철 술페이트 히드록시드, 칼륨 소듐 술페이트, 은 철 술페이트 히드록시드, 은 철 술페이트 히드록시드, 소듐 알루미늄 술페이트 히드록시드, 소듐 칼슘 보레이트 술페이트 클로라이드 히드록시드, 소듐 칼슘 칼륨 알루미늄 술페이트 히드록시드, 소듐 칼슘 술페이트, 소듐 카르보네이트 술페이트, 소듐 이올레이트 술페이트, 소듐 철 술페이트 히드록시드, 소듐 마그네슘 술페이트, 소듐 칼륨 카르보네이트 술페이트 클로라이드, 황산나트륨, 스트론튬 알루미늄 포스페이트 술페이트 히드록시드, 스트론튬 세륨 알루미늄 아르세네이트 술페이트 히드록시드, 스트론튬 술페이트, 탈륨 칼륨 철 술페이트 히드록시드, 또는 그의 임의의 조합을 포함한다.

[0119] 일부 실시양태에서, 제1 용매 및 제2 용매 중 적어도 1개는 포름산, n-부탄올, 이소프로판올, n-프로판올, 에탄올, 메탄올, 아세트산, 물, 탈이온수 또는 그의 임의의 조합을 포함한다.

[0120] 일부 실시양태에서, 제1 산은 과염소산, 아이오딘화수소산, 브로민화수소산, 염산, 황산, p-톨루엔술폰산 메탄술폰산 또는 그의 임의의 조합을 포함한다.

[0121] 일부 실시양태에서, 제2 산은 포름산, 아스코르브산, 아세트산, 트리클로로아세트산, 플루오린화수소산, 시안화수소산, 황화수소 또는 그의 임의의 조합을 포함한다.

[0122] 일부 실시양태에서, 황 전구체의 농도는 약 0.5 M 내지 약 2 M이다. 일부 실시양태에서, 황 전구체의 농도는 적어도 약 0.5 M이다. 일부 실시양태에서, 황 전구체의 농도는 최대 약 2 M이다. 일부 실시양태에서, 황 전구체의 농도는 약 0.5 M 내지 약 0.75 M, 약 0.5 M 내지 약 1 M, 약 0.5 M 내지 약 1.25 M, 약 0.5 M 내지 약 1.5 M, 약 0.5 M 내지 약 1.75 M, 약 0.5 M 내지 약 2 M, 약 0.75 M 내지 약 1 M, 약 0.75 M 내지 약 1.25 M, 약 0.75 M 내지 약 1.5 M, 약 0.75 M 내지 약 1.75 M, 약 0.75 M 내지 약 2 M, 약 1 M 내지 약 1.25 M, 약 1 M 내지 약 1.5 M, 약 1 M 내지 약 1.75 M, 약 1 M 내지 약 2 M, 약 1.25 M 내지 약 1.5 M, 약 1.25 M 내지 약 1.75 M, 약 1.25 M 내지 약 2 M, 약 1.5 M 내지 약 1.75 M, 약 1.5 M 내지 약 2 M, 또는 약 1.75 M 내지 약 2 M이다.

[0123] 일부 실시양태에서, GO 현탁액의 농도는 약 1.1 g/L 내지 약 4.6 g/L이다. 일부 실시양태에서, GO 현탁액의 농도는 적어도 약 1.1 g/L이다. 일부 실시양태에서, GO 현탁액의 농도는 최대 약 4.6 g/L이다. 일부 실시양태에서, GO 현탁액의 농도는 약 1.1 g/L 내지 약 1.25 g/L, 약 1.1 g/L 내지 약 1.5 g/L, 약 1.1 g/L 내지 약 1.75 g/L, 약 1.1 g/L 내지 약 2 g/L, 약 1.1 g/L 내지 약 2.5 g/L, 약 1.1 g/L 내지 약 3 g/L, 약 1.1 g/L 내지 약 3.5 g/L, 약 1.1 g/L 내지 약 4 g/L, 약 1.1 g/L 내지 약 4.6 g/L, 약 1.25 g/L 내지 약 1.5 g/L, 약 1.25 g/L 내지 약 1.75 g/L, 약 1.25 g/L 내지 약 2 g/L, 약 1.25 g/L 내지 약 2.5 g/L, 약 1.25 g/L 내지 약 3 g/L, 약 1.25 g/L 내지 약 3.5 g/L, 약 1.25 g/L 내지 약 4 g/L, 약 1.25 g/L 내지 약 4.6 g/L, 약 1.5 g/L 내지 약 1.75 g/L, 약 1.5 g/L 내지 약 2 g/L, 약 1.5 g/L 내지 약 2.5 g/L, 약 1.5 g/L 내지 약 3 g/L, 약 1.5 g/L 내지 약 3.5 g/L, 약 1.5 g/L 내지 약 4 g/L, 약 1.5 g/L 내지 약 4.6 g/L, 약 1.75 g/L 내지 약 2 g/L, 약 1.75 g/L 내지 약 2.5 g/L, 약 1.75 g/L 내지 약 3 g/L, 약 1.75 g/L 내지 약 3.5 g/L, 약 1.75 g/L 내지 약 4 g/L, 약 1.75 g/L 내지 약 4.6 g/L, 약 2 g/L 내지 약 2.5 g/L, 약 2 g/L 내지 약 3 g/L, 약 2 g/L 내지 약 3.5 g/L, 약 2 g/L 내지 약 4 g/L, 약 2 g/L 내지 약 4.6 g/L, 약 2.5 g/L 내지 약 3 g/L, 약 2.5 g/L 내지 약 3.5 g/L, 약 2.5 g/L 내지 약 4 g/L, 약 2.5 g/L 내지 약 4.6 g/L, 약 3 g/L 내지 약 3.5 g/L, 약 3 g/L 내지 약 4 g/L, 약 3 g/L 내지 약 4.6 g/L, 약 3.5 g/L 내지 약 4 g/L, 약 3.5 g/L 내지 약 4.6 g/L, 또는 약 4 g/L 내지 약 4.6 g/L이다.

[0124] 일부 실시양태에서, 제1 산 및 제2 산 중 적어도 1개의 농도는 적어도 약 0.5 M이다. 일부 실시양태에서, 제1 산 및 제2 산 중 적어도 1개의 농도는 최대 약 4 M이다. 일부 실시양태에서, 제1 산 및 제2 산 중 적어도 1개의 농도는 약 0.5 M 내지 약 4 M이다. 일부 실시양태에서, 제1 산 및 제2 산 중 적어도 1개의 농도는 약 0.5 M 내지 약 1 M, 약 0.5 M 내지 약 1.5 M, 약 0.5 M 내지 약 2 M, 약 0.5 M 내지 약 2.5 M, 약 0.5 M 내지 약 3 M, 약 0.5 M 내지 약 3.5 M, 약 0.5 M 내지 약 4 M, 약 1 M 내지 약 1.5 M, 약 1 M 내지 약 2 M, 약 1 M 내지 약 2.5 M, 약 1 M 내지 약 3 M, 약 1 M 내지 약 3.5 M, 약 1 M 내지 약 4 M, 약 1.5 M 내지 약 2 M, 약 1.5 M 내지 약 2.5 M, 약 1.5 M 내지 약 3 M, 약 1.5 M 내지 약 3.5 M, 약 1.5 M 내지 약 4 M, 약 2 M 내지 약 2.5 M, 약 2 M 내지 약 3 M, 약 2 M 내지 약 3.5 M, 약 2 M 내지 약 4 M, 약 2.5 M 내지 약 3 M, 약 2.5 M 내지 약

3.5 M, 약 2.5 M 내지 약 4 M, 약 3 M 내지 약 3.5 M, 약 3 M 내지 약 4 M, 또는 약 3.5 M 내지 약 4 M이다.

[0125] 일부 실시양태에서, 제2 용액이 가열되는 온도는 약 48℃ 내지 약 190℃이다. 일부 실시양태에서, 제2 용액이 가열되는 온도는 적어도 약 48℃이다. 일부 실시양태에서, 제2 용액이 가열되는 온도는 최대 약 190℃이다. 일부 실시양태에서, 제2 용액이 가열되는 온도는 약 48℃ 내지 약 60℃, 약 48℃ 내지 약 80℃, 약 48℃ 내지 약 100℃, 약 48℃ 내지 약 120℃, 약 48℃ 내지 약 140℃, 약 48℃ 내지 약 160℃, 약 48℃ 내지 약 190℃, 약 60℃ 내지 약 80℃, 약 60℃ 내지 약 100℃, 약 60℃ 내지 약 120℃, 약 60℃ 내지 약 140℃, 약 60℃ 내지 약 160℃, 약 60℃ 내지 약 190℃, 약 80℃ 내지 약 100℃, 약 80℃ 내지 약 120℃, 약 80℃ 내지 약 140℃, 약 80℃ 내지 약 160℃, 약 80℃ 내지 약 190℃, 약 100℃ 내지 약 120℃, 약 100℃ 내지 약 140℃, 약 100℃ 내지 약 160℃, 약 100℃ 내지 약 190℃, 약 120℃ 내지 약 140℃, 약 120℃ 내지 약 160℃, 약 120℃ 내지 약 190℃, 약 140℃ 내지 약 160℃, 약 140℃ 내지 약 190℃, 또는 약 160℃ 내지 약 190℃이다.

[0126] 일부 실시양태에서, 그래핀 옥시드 현탁액의 형성은 허머 (Hummer)법에 의해 수행된다.

[0127] 일부 실시양태에서, 방법은 연속적으로 롤-투-롤 공정에서 전극을 형성한다.

[0128] 일부 실시양태에서, 현탁액은 약 12시간 내지 약 24시간의 시간 주기 동안 건조된다. 일부 실시양태에서, 현탁액은 적어도 약 12시간의 시간 주기 동안 건조된다. 일부 실시양태에서, 현탁액은 최대 약 24시간의 시간 주기 동안 건조된다. 일부 실시양태에서, 현탁액은 약 12 시간 내지 약 14 시간, 약 12 시간 내지 약 16 시간, 약 12 시간 내지 약 18 시간, 약 12 시간 내지 약 20 시간, 약 12 시간 내지 약 22 시간, 약 12 시간 내지 약 24 시간, 약 14 시간 내지 약 16 시간, 약 14 시간 내지 약 18 시간, 약 14 시간 내지 약 20 시간, 약 14 시간 내지 약 22 시간, 약 14 시간 내지 약 24 시간, 약 16 시간 내지 약 18 시간, 약 16 시간 내지 약 20 시간, 약 16 시간 내지 약 22 시간, 약 16 시간 내지 약 24 시간, 약 18 시간 내지 약 20 시간, 약 18 시간 내지 약 22 시간, 약 18 시간 내지 약 24 시간, 약 20 시간 내지 약 22 시간, 약 20 시간 내지 약 24 시간, 또는 약 22 시간 내지 약 24 시간의 시간 주기 동안 건조된다.

[0129] 일부 실시양태에서, 현탁액이 건조되는 온도는 약 50℃ 내지 약 150℃이다. 일부 실시양태에서, 현탁액이 건조되는 온도는 적어도 약 50℃이다. 일부 실시양태에서, 현탁액이 건조되는 온도는 최대 약 150℃이다. 일부 실시양태에서, 현탁액이 건조되는 온도는 약 50℃ 내지 약 75℃, 약 50℃ 내지 약 100℃, 약 50℃ 내지 약 125℃, 약 50℃ 내지 약 150℃, 약 75℃ 내지 약 100℃, 약 75℃ 내지 약 125℃, 약 75℃ 내지 약 150℃, 약 100℃ 내지 약 125℃, 약 100℃ 내지 약 150℃, 또는 약 125℃ 내지 약 150℃이다.

[0130] 일부 실시양태는, 황 전구체의 부분을 그래핀 옥시드 현탁액 및 제1 용매에 첨가하는 것; 제1 산을 첨가하여 제1 용액을 형성하는 것; 제1 용액을 교반하는 것; 제1 용액에 제2 산을 첨가하여 제2 용액을 형성하는 것; 제2 용액을 가열하는 것; 제2 용매에서 제2 용액을 세척하는 것; 및 제2 용액을 동결 건조하는 것을 추가로 포함한다.

[0131] 일부 실시양태에서, 황 전구체의 부피는 약 0.05 ml 내지 약 2 ml이다. 일부 실시양태에서, 황 전구체의 부피는 적어도 약 0.05 ml이다. 일부 실시양태에서, 황 전구체의 부피는 최대 약 2 ml이다. 일부 실시양태에서, 황 전구체의 부피는 약 0.05 ml 내지 약 0.1 ml, 약 0.05 ml 내지 약 0.25 ml, 약 0.05 ml 내지 약 0.5 ml, 약 0.05 ml 내지 약 0.75 ml, 약 0.05 ml 내지 약 1 ml, 약 0.05 ml 내지 약 1.25 ml, 약 0.05 ml 내지 약 1.5 ml, 약 0.05 ml 내지 약 1.75 ml, 약 0.05 ml 내지 약 2 ml, 약 0.1 ml 내지 약 0.25 ml, 약 0.1 ml 내지 약 0.5 ml, 약 0.1 ml 내지 약 0.75 ml, 약 0.1 ml 내지 약 1 ml, 약 0.1 ml 내지 약 1.25 ml, 약 0.1 ml 내지 약 1.5 ml, 약 0.1 ml 내지 약 1.75 ml, 약 0.1 ml 내지 약 2 ml, 약 0.25 ml 내지 약 0.5 ml, 약 0.25 ml 내지 약 0.75 ml, 약 0.25 ml 내지 약 1 ml, 약 0.25 ml 내지 약 1.25 ml, 약 0.25 ml 내지 약 1.5 ml, 약 0.25 ml 내지 약 1.75 ml, 약 0.25 ml 내지 약 2 ml, 약 0.5 ml 내지 약 0.75 ml, 약 0.5 ml 내지 약 1 ml, 약 0.5 ml 내지 약 1.25 ml, 약 0.5 ml 내지 약 1.5 ml, 약 0.5 ml 내지 약 1.75 ml, 약 0.5 ml 내지 약 2 ml, 약 0.75 ml 내지 약 1 ml, 약 0.75 ml 내지 약 1.25 ml, 약 0.75 ml 내지 약 1.5 ml, 약 0.75 ml 내지 약 1.75 ml, 약 0.75 ml 내지 약 2 ml, 약 1 ml 내지 약 1.25 ml, 약 1 ml 내지 약 1.5 ml, 약 1 ml 내지 약 1.75 ml, 약 1 ml 내지 약 2 ml, 약 1.25 ml 내지 약 1.5 ml, 약 1.25 ml 내지 약 1.75 ml, 약 1.25 ml 내지 약 2 ml, 약 1.5 ml 내지 약 1.75 ml, 약 1.5 ml 내지 약 2 ml, 또는 약 1.75 ml 내지 약 2 ml이다.

[0132] 일부 실시양태에서, GO 현탁액의 부피는 약 0.1 ml 내지 약 0.5 ml이다. 일부 실시양태에서, GO 현탁액의 부피는 적어도 약 0.1 ml이다. 일부 실시양태에서, GO 현탁액의 부피는 최대 약 0.5 ml이다. 일부 실시양태에서, GO 현탁액의 부피는 약 0.1 ml 내지 약 0.2 ml, 약 0.1 ml 내지 약 0.3 ml, 약 0.1 ml 내지 약 0.4 ml, 약 0.1

ml 내지 약 0.5 ml, 약 0.2 ml 내지 약 0.3 ml, 약 0.2 ml 내지 약 0.4 ml, 약 0.2 ml 내지 약 0.5 ml, 약 0.3 ml 내지 약 0.4 ml, 약 0.3 ml 내지 약 0.5 ml, 또는 약 0.4 ml 내지 약 0.5 ml이다.

[0133] 일부 실시양태에서, 제1 용매의 부피는 약 0.3 ml 내지 약 1.2 ml이다. 일부 실시양태에서, 제1 용매의 부피는 적어도 약 0.3 ml이다. 일부 실시양태에서, 제1 용매의 부피는 최대 약 1.2 ml이다. 일부 실시양태에서, 제1 용매의 부피는 약 0.3 ml 내지 약 0.4 ml, 약 0.3 ml 내지 약 0.5 ml, 약 0.3 ml 내지 약 0.6 ml, 약 0.3 ml 내지 약 0.7 ml, 약 0.3 ml 내지 약 0.8 ml, 약 0.3 ml 내지 약 0.9 ml, 약 0.3 ml 내지 약 1 ml, 약 0.3 ml 내지 약 1.1 ml, 약 0.3 ml 내지 약 1.2 ml, 약 0.4 ml 내지 약 0.5 ml, 약 0.4 ml 내지 약 0.6 ml, 약 0.4 ml 내지 약 0.7 ml, 약 0.4 ml 내지 약 0.8 ml, 약 0.4 ml 내지 약 0.9 ml, 약 0.4 ml 내지 약 1 ml, 약 0.4 ml 내지 약 1.1 ml, 약 0.4 ml 내지 약 1.2 ml, 약 0.5 ml 내지 약 0.6 ml, 약 0.5 ml 내지 약 0.7 ml, 약 0.5 ml 내지 약 0.8 ml, 약 0.5 ml 내지 약 0.9 ml, 약 0.5 ml 내지 약 1 ml, 약 0.5 ml 내지 약 1.1 ml, 약 0.5 ml 내지 약 1.2 ml, 약 0.6 ml 내지 약 0.7 ml, 약 0.6 ml 내지 약 0.8 ml, 약 0.6 ml 내지 약 0.9 ml, 약 0.6 ml 내지 약 1 ml, 약 0.6 ml 내지 약 1.1 ml, 약 0.6 ml 내지 약 1.2 ml, 약 0.7 ml 내지 약 0.8 ml, 약 0.7 ml 내지 약 0.9 ml, 약 0.7 ml 내지 약 1 ml, 약 0.7 ml 내지 약 1.1 ml, 약 0.7 ml 내지 약 1.2 ml, 약 0.8 ml 내지 약 0.9 ml, 약 0.8 ml 내지 약 1 ml, 약 0.8 ml 내지 약 1.1 ml, 약 0.8 ml 내지 약 1.2 ml, 약 0.9 ml 내지 약 1 ml, 약 0.9 ml 내지 약 1.1 ml, 약 0.9 ml 내지 약 1.2 ml, 약 1 ml 내지 약 1.1 ml, 약 1 ml 내지 약 1.2 ml, 또는 약 1.1 ml 내지 약 1.2 ml이다.

[0134] 일부 실시양태에서, 제1 용매는 포름산, n-부탄올, 이소프로판올, n-프로판올, 에탄올, 메탄올, 아세트산, 물, 탈이온수 또는 그의 임의의 조합을 포함한다.

[0135] 일부 실시양태에서, 제1 산의 부피는 약 0.05 ml 내지 약 0.2 ml이다. 일부 실시양태에서, 제1 산의 부피는 적어도 약 0.05 ml이다. 일부 실시양태에서, 제1 산의 부피는 최대 약 0.2 ml이다. 일부 실시양태에서, 제1 산의 부피는 약 0.05 ml 내지 약 0.075 ml, 약 0.05 ml 내지 약 0.1 ml, 약 0.05 ml 내지 약 0.125 ml, 약 0.05 ml 내지 약 0.15 ml, 약 0.05 ml 내지 약 0.175 ml, 약 0.05 ml 내지 약 0.2 ml, 약 0.075 ml 내지 약 0.1 ml, 약 0.075 ml 내지 약 0.125 ml, 약 0.075 ml 내지 약 0.15 ml, 약 0.075 ml 내지 약 0.175 ml, 약 0.075 ml 내지 약 0.2 ml, 약 0.1 ml 내지 약 0.125 ml, 약 0.1 ml 내지 약 0.15 ml, 약 0.1 ml 내지 약 0.175 ml, 약 0.1 ml 내지 약 0.2 ml, 약 0.125 ml 내지 약 0.15 ml, 약 0.125 ml 내지 약 0.175 ml, 약 0.125 ml 내지 약 0.2 ml, 약 0.15 ml 내지 약 0.175 ml, 약 0.15 ml 내지 약 0.2 ml, 또는 약 0.175 ml 내지 약 0.2 ml이다.

[0136] 일부 실시양태에서, 제1 산은 강산이다. 일부 실시양태에서, 강산은 과염소산, 아이오딘화수소산, 브로민화수소산, 염산, 황산, p-톨루엔술폰산 메탄술폰산 또는 그의 임의의 조합을 포함한다. 일부 실시양태에서, 제1 산은 적가된다.

[0137] 일부 실시양태에서, 제1 용액은 약 1시간 내지 약 4시간의 시간 주기 동안 교반된다. 일부 실시양태에서, 제1 용액은 적어도 약 1시간의 시간 주기 동안 교반된다. 일부 실시양태에서, 제1 용액은 최대 약 4시간의 시간 주기 동안 교반된다. 일부 실시양태에서, 제1 용액은 약 1시간 내지 약 1.5시간, 약 1시간 내지 약 2시간, 약 1시간 내지 약 2.5시간, 약 1시간 내지 약 3시간, 약 1시간 내지 약 3.5시간, 약 1시간 내지 약 4시간, 약 1.5시간 내지 약 2시간, 약 1.5시간 내지 약 2.5시간, 약 1.5시간 내지 약 3시간, 약 1.5시간 내지 약 3.5시간, 약 1.5시간 내지 약 4시간, 약 2시간 내지 약 2.5시간, 약 2시간 내지 약 3시간, 약 2시간 내지 약 3.5시간, 약 2시간 내지 약 4시간, 약 2.5시간 내지 약 3시간, 약 2.5시간 내지 약 3.5시간, 약 2.5시간 내지 약 4시간, 약 3시간 내지 약 3.5시간, 약 3시간 내지 약 4시간, 또는 약 3.5시간 내지 약 4시간의 시간 주기 동안 교반된다.

[0138] 일부 실시양태에서, 제2 산의 부피는 약 10 μL 내지 약 40 μL이다. 일부 실시양태에서, 제2 산의 부피는 적어도 약 10 μL이다. 일부 실시양태에서, 제2 산의 부피는 최대 약 40 μL이다. 일부 실시양태에서, 제2 산의 부피는 약 10 μL 내지 약 15 μL, 약 10 μL 내지 약 20 μL, 약 10 μL 내지 약 25 μL, 약 10 μL 내지 약 30 μL, 약 10 μL 내지 약 35 μL, 약 10 μL 내지 약 40 μL, 약 15 μL 내지 약 20 μL, 약 15 μL 내지 약 25 μL, 약 15 μL 내지 약 30 μL, 약 15 μL 내지 약 35 μL, 약 15 μL 내지 약 40 μL, 약 20 μL 내지 약 25 μL, 약 20 μL 내지 약 30 μL, 약 20 μL 내지 약 35 μL, 약 20 μL 내지 약 40 μL, 약 25 μL 내지 약 30 μL, 약 25 μL 내지 약 35 μL, 약 25 μL 내지 약 40 μL, 약 30 μL 내지 약 35 μL, 약 30 μL 내지 약 40 μL, 또는 약 35 μL 내지 약 40 μL이다.

[0139] 일부 실시양태에서, 제2 산의 농도는 약 0.5 M 내지 약 2 M이다. 일부 실시양태에서, 제2 산의 농도는 적어도 약 0.5 M이다. 일부 실시양태에서, 제2 산의 농도는 최대 약 2 M이다. 일부 실시양태에서, 제2 산의 농도는 약 0.5 M 내지 약 0.75 M, 약 0.5 M 내지 약 1 M, 약 0.5 M 내지 약 1.25 M, 약 0.5 M 내지 약 1.5 M, 약 0.5

M 내지 약 1.75 M, 약 0.5 M 내지 약 2 M, 약 0.75 M 내지 약 1 M, 약 0.75 M 내지 약 1.25 M, 약 0.75 M 내지 약 1.5 M, 약 0.75 M 내지 약 1.75 M, 약 0.75 M 내지 약 2 M, 약 1 M 내지 약 1.25 M, 약 1 M 내지 약 1.5 M, 약 1 M 내지 약 1.75 M, 약 1 M 내지 약 2 M, 약 1.25 M 내지 약 1.5 M, 약 1.25 M 내지 약 1.75 M, 약 1.25 M 내지 약 2 M, 약 1.5 M 내지 약 1.75 M, 약 1.5 M 내지 약 2 M, 또는 약 1.75 M 내지 약 2 M이다.

[0140] 일부 실시양태에서, 제2 산은 약산을 포함한다. 일부 실시양태에서, 약산은 포름산, 아스코르브산, 아세트산, 트리클로로아세트산, 플루오린화수소산, 시안화수소산, 황화수소 또는 그의 임의의 조합을 포함한다.

[0141] 일부 실시양태에서, 제2 용액이 가열되는 시간 주기는 약 1시간 내지 약 4시간이다. 일부 실시양태에서, 제2 용액이 가열되는 시간 주기는 적어도 약 1시간이다. 일부 실시양태에서, 제2 용액이 가열되는 시간 주기는 최대 약 4시간이다. 일부 실시양태에서, 제2 용액이 가열되는 시간 주기는 약 1시간 내지 약 1.5시간, 약 1시간 내지 약 2시간, 약 1시간 내지 약 2.5시간, 약 1시간 내지 약 3시간, 약 1시간 내지 약 3.5시간, 약 1시간 내지 약 4시간, 약 1.5시간 내지 약 2시간, 약 1.5시간 내지 약 2.5시간, 약 1.5시간 내지 약 3시간, 약 1.5시간 내지 약 3.5시간, 약 1.5시간 내지 약 4시간, 약 2시간 내지 약 2.5시간, 약 2시간 내지 약 3시간, 약 2시간 내지 약 3.5시간, 약 2시간 내지 약 4시간, 약 2.5시간 내지 약 3시간, 약 2.5시간 내지 약 3.5시간, 약 2.5시간 내지 약 4시간, 약 3시간 내지 약 3.5시간, 약 3시간 내지 약 4시간, 또는 약 3.5시간 내지 약 4시간이다.

[0142] 일부 실시양태에서, 제2 용매는 포름산, n-부탄올, 이소프로판올, n-프로판올, 에탄올, 메탄올, 아세트산, 물, 탈이온수 또는 그의 임의의 조합을 포함한다.

[0143] 일부 실시양태에서, 본원에 기재된 그래핀 프레임워크는 다양한 다른 전기 저장 수단 또는 비-전기 저장 수단을 위해 사용될 수 있다.

[0144] 본원에 기재된 실시양태의 다른 목적 및 이점은 추가로 하기 상세 및 첨부 도면과 관련하여 고려될 때 인지되고 이해될 것이다. 하기 상세가 본원에 기재된 특정한 실시양태를 기재하는 구체적 세부사항을 함유할 수 있지만, 이는 본원에 기재된 실시양태의 범위에 대한 제한으로 간주되어서는 안 되고, 오히려 바람직한 실시양태의 예시로서 간주되어야 한다. 본원에 기재된 각 실시양태에 대해서, 많은 변형은 본원에 시사된 바와 같이 가능하며, 이는 관련 기술분야의 통상의 기술자에게 공지되어 있다. 다양한 변화 및 변형은 그의 취지로부터 벗어나지 않고 본원에 기재된 실시양태의 범위 내에서 이루어질 수 있다.

도면의 간단한 설명

[0145] 개시내용의 신규 특색은 첨부된 청구범위에서 특정하게 기재된다. 본 개시내용의 특색 및 이점의 보다 우수한 이해는 실시양태의 원칙이 사용되는 예시적 실시양태, 첨부 도면 또는 도면 (또한 본원에서는 "도")을 기재하는 하기 상세한 설명을 참고로 획득될 것이며, 이는:

도 1a-c는 다른 기존 에너지 저장 기술 및 성능 목표와 비교하여, 3차원 그래핀 프레임워크 및 전기화학 커패시터에 대한 장치-수준 중량측정/부피측정 에너지 밀도 대 출력 밀도의 라곤 (Ragone) 플롯을 나타낸다.

도 2는 압축된 및 비압축된 구멍이 많은 3차원 그래핀 프레임워크 및 그래핀 프레임워크의 용매화 3차원 거대다공성 구조의 개략도를 나타낸다.

도 3은 집전체 상에 침착된 구멍이 많은 그래핀 잉크의 개략도를 나타낸다.

도 4는 리튬 이온의 통과는 허용하면서 보다 큰 리튬 폴리술피드의 이동은 방지하는 크기를 갖는 나노포어를 갖는 구멍이 많은 3차원 그래핀 프레임워크의 개략도를 나타낸다.

도 5는 3차원 그래핀 프레임워크 및 황의 자립형 복합체의 구조 및 상기 구조 내에 캡슐화된 황 입자의 개략도를 나타낸다.

도 6은 그래핀 옥시드, 구멍이 많은 그래핀 옥시드, 및 결합된 구멍이 많은 그래핀 히드로겔의 수성 분산액의 예시적인 사진을 나타낸다.

도 7은 그래핀 옥시드 용액, $Na_2S_2O_3$ 및 HCl 함유 그래핀 옥시드 용액, 및 아스코르브산 중 환원 그래핀 옥시드의 예시적인 사진을 나타낸다.

도 8은 코인 전지와 파우치 전지 사이의 크기 차이를 입증하는 예시적인 사진을 나타낸다.

도 9는 비압축된 및 압축된 구멍이 많은 3차원 그래핀 프레임워크 (H3DGF)의 내부 마이크로구조의 예시적인 SEM

영상, 및 기계적인 압축 전후의 H3DGF의 예시적인 사진, 및 압축된 H3DGF의 가요성을 나타낸다.

도 10은 H3DGF-Nb_2O_5 복합체의 예시적인 SEM 영상을 나타낸다.

도 11은 고 질량 로딩을 갖는 H3DGF-Si 복합체의 예시적인 SEM 영상을 나타낸다.

도 12는 3DGF-S 복합체의 다공성 상호연결된 프레임워크, 및 그 안의 1-μm 황 입자의 예시적인 횡단면 SEM 영상을 나타낸다.

도 13은 3DGF-S 복합 전극에 캡슐화된 황 입자의 예시적인 저-배율 TEM 영상, 및 그래핀 포켓 내에 함유된 용융된 황의 운동의 다중 프레임을 나타낸다.

도 14는 예시적인 3DGF-S의 예시적인 저 및 고 배율 SEM 영상을 나타낸다.

도 15는 H3DGF-S 복합체의 예시적인 정전류 시험 결과를 나타낸다.

도 16은 순수한 황, 그래핀 옥시드/황, 및 약 90%의 황 함량을 갖는 3DGF-S (3DGF-S)의 예시적인 X선 회절 결과를 나타낸다.

도 17은 상이한 황 로딩 백분율을 갖는 H3DGF-S 복합체의 예시적인 온도그래프 시험 결과를 나타낸다.

도 18은 3DGF-S90의 제1, 제20 및 제50 사이클의 예시적인 충전 및 방전 프로파일, 0.1 C에서의 3DGF-S70, 80, 90 및 95의 사이클링 성능, 0.2 C, 0.5 C, 1 C, 및 2 C에서의 3DGF-S90의 레이트 성능, 및 500 사이클에 대한 1 C에서의 3DGF-S90 사이클링을 나타낸다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

[0146] 개선된 성능을 갖는 그래핀 물질, 제조 공정 및 장치가 본원에 제공된다. 일부 실시양태에서, 본 개시내용은 그래핀 물질을 포함하는 슈퍼커패시터 (SC) 및 그의 제조 공정을 제공한다. 이러한 SC는 현행 에너지 저장 기술의 결점을 회피한다. 본 개시내용의 SC는 1개 이상의 슈퍼커패시터 전지를 포함할 수 있다. SC는 양극 및 음극을 포함할 수 있다. SC의 양극 및 음극은 분리기로 분리될 수 있다. 분리기는 전해질을 포함할 수 있다. 양극은 방전 동안 캐소드일 수 있다. 음극은 방전 동안 애노드일 수 있다. 일부 실시양태에서, 복수의 슈퍼커패시터 전지가 팩에 배열 (예를 들어, 상호연결)될 수 있다.

[0147] 본원에 기재된 개시내용의 다양한 측면이 하기 기재된 임의의 특별한 응용분야, 또는 임의의 다른 유형의 제조, 합성 또는 가공 셋팅에서 적용될 수 있다. 물질의 다른 제조, 합성 또는 가공은 본원에 기재된 특색으로부터 동등하게 유익하다. 예를 들어, 본원에서의 방법, 장치 및 시스템은 유리하게는 그래핀 또는 그래핀 옥시드의 다양한 형태의 제조 (또는 합성)에 적용될 수 있다. 본원에 기재된 실시양태는 단독형 방법, 장치 또는 시스템으로서, 또는 통합된 제조 또는 물질 (예를 들어, 화학물질) 가공 시스템의 일부로서 적용될 수 있다. 개시내용의 다른 측면은 개별적으로, 집합적으로, 또는 서로 조합되어 인지됨이 이해될 것이다.

[0148] 개시내용의 한 측면은 2개 이상의 전극 및 전극 사이에 배치된 전해질을 포함하는 슈퍼커패시터 장치를 제공하며, 여기서 각각의 전극은 3차원 다공성 프레임워크로 구성된다.

[0149] 개시내용의 한 측면은 활성 물질을 포함하는 전극을 제공하며, 활성 물질은 3차원 그래핀 프레임워크 (3DGF) 또는 구멍이 많은 3차원 그래핀 프레임워크 (H3DGF)를 포함한다. 개시내용의 또 다른 측면은 용량성 또는 슈도-용량성 복합 재료를 포함하는 복합 전극을 제공한다.

[0150] 지금부터는, 도면을 참조할 것이다. 도면 및 그 안의 특색이 반드시 축척에 맞게 그려지지는 않음은 인지될 것이다. 본원에 언급된 개략도, 영상, 화학식, 차트 및 그래프는 본원에 기재된 예시적인 방법에 의해 제조된 장치의 외관, 특성 및 기능성의 표현으로서 제공하는 제조된 예시적인 장치를 나타낸다.

[0151] 용어 및 정의

[0152] 달리 정의되지 않는 한, 본원에 사용된 모든 기술 용어는 관련 기술분야의 통상의 기술자에 의해 일반적으로 이해된 바와 동일한 의미를 갖는다. 본 명세서 및 첨부된 청구범위에 사용된 바와 같이, 단수 형태는 문맥이 달리 명백하게 지시하지 않는 한 복수 지시대상을 포함한다. 본원에서 "또는"에 대한 임의의 언급은 달리 언급되지 않는 한 "및/또는"을 포함하도록 의도된다.

[0153] 본원에 사용되고 달리 정의되지 않는 한, 용어 "약"은 특정한 값의 플러스 및/또는 마이너스 10% 내에서의 값의

범위를 지칭한다.

[0154] 본원에 사용되고 달리 명시되지 않는 한, 용어 GO는 그래핀 옥시드를 지칭한다.

[0155] 본원에 사용되고 달리 명시되지 않는 한, 용어 RGO는 환원 그래핀 옥시드를 지칭한다.

[0156] 본원에 사용되고 달리 명시되지 않는 한, 용어 3D는 3차원을 지칭한다.

[0157] 본원에 사용되고 달리 명시되지 않는 한, 용어 3DGF 또는 3DG는 3차원 그래핀 프레임워크를 지칭한다.

[0158] 본원에 사용되고 달리 명시되지 않는 한, H3DGF는 구멍이 많은 3차원 그래핀 프레임워크를 지칭한다.

[0159] 본원에 사용되고 달리 명시되지 않는 한, 용어 SEM은 스캐닝 전자 현미경을 지칭한다.

[0160] 본원에 사용되고 달리 명시되지 않는 한, TEM은 투과 전자 현미경을 지칭한다.

[0161] 본원에 사용되고 달리 명시되지 않는 한, XRD는 X-선 분말 회절을 지칭한다.

[0162] 본원에 사용되고 달리 명시되지 않는 한, C-레이트는 에너지 저장 장치가 그의 최대 용량과 관련하여 충전되거나 또는 방전되는 속도의 척도이다.

[0163] 본원에 사용되고 달리 명시되지 않는 한, 활성화는 샘플이 후속 반응을 위해 준비되거나 또는 여기되는 과정을 지칭한다.

[0164] 본원에 사용되고 달리 명시되지 않는 한, 리튬화는 리튬 또는 유기리튬 화합물과의 반응을 지칭한다.

[0165] 본원에 사용되고 달리 명시되지 않는 한, 전구체는 또 다른 화합물을 생성하는 화학 반응에 참가하는 화합물이다.

[0166] 본원에 사용되고 달리 명시되지 않는 한, 쿨롱 효율 (또한 패러데이 효율, 패러데이 수율, 쿨롱 효율 또는 전류 효율로 칭함)은 전기화학 반응을 용이하게 하도록 전하 (전자)가 시스템에서 이동하는 효율을 기재한다.

[0167] 본원에 사용되고 달리 명시되지 않는 한, 전극-비 (electrode-specific)는 전극의 중량 또는 부피에 의해 정규화된 측정치를 지칭한다.

[0168] 본원에 사용되고 달리 명시되지 않는 한, 황-비 (sulfur-specific)는 황의 중량 또는 부피에 의해 정규화된 측정치를 지칭한다.

[0169] 본원에 사용되고 달리 명시되지 않는 한, 나노포어는 그의 직경이 약 1 nm 내지 약 1,000 nm인 세공을 지칭한다.

[0170] 본원에 사용되고 달리 명시되지 않는 한, 마이크로포어는 직경이 약 1 μm 내지 약 1,000 μm인 세공을 지칭한다.

[0171] 본원에 사용되고 달리 명시되지 않는 한, mF는 밀리패럿을 지칭한다.

[0172] 바람직한 실시양태가 본원에 나타내지고 기재되지만, 이러한 실시양태는 단지 예로서 제공된다는 것은 관련 기술분야의 통상의 기술자에 명백할 것이다. 수많은 변경, 변화, 치환이 이제부터 관련 기술분야의 통상의 기술자에게 일어날 것이다. 본원에 기재된 실시양태에 대한 다양한 대안이 사용될 수 있다는 것은 이해되어야 한다.

[0173] 전기 에너지 저장 장치

[0174] 도 1a-c에 관하여, 배터리 및 SC는 2종의 상보적인 에너지 저장 기술을 나타내는데, 배터리가 높은 에너지 밀도 및 낮은 출력 밀도를 제공할 수 있는 반면에, SC는 우수한 출력 밀도 및 낮은 에너지 밀도를 제공할 수 있다. 이상적 에너지 저장 장치는 높은 에너지 밀도 및 높은 출력 밀도 모두를 제공할 수 있을 것이다. 초고 출력 밀도를 넘어서, SC는 또한 그의 긴 사이클 수명 및 낮은 유지 비용으로 인해 매력적이다.

[0175] 전기 에너지 저장 장치 (EESD)는 모바일 전자기기, 하이브리드 전기 차량, 재생가능 에너지 수거 및 에너지 전환의 응용을 위해 중요성이 증대되고 있다. 리튬 이온 배터리가 현행 에너지 저장 기술의 주요 공급원을 대표하지만, 리튬 이온 배터리 용량은 캐소드 물질, 예컨대 $LiCoO_2$ (약 272 mAh/g) 및 $LiFePO_4$ (약 170 mAh/g)의 이론 용량에 의해 크게 제약될 수 있고, 이는 에너지 저장에 대한 증가하는 소비자 요구를 만족시킬 수 없다.

[0176] 상업적으로 입수가능한 SC는 광범위한 채택에 적당하지 않을 수 있는데, 이는 그의 에너지 밀도가 전형적으로

상업적으로 입수가능한 리튬 이온 (리튬-이온) 배터리의 것보다 1-2 자릿수만큼 더 낮기 때문이다. 이러한 배경으로 본 개시내용에 기재된 실시양태를 개발하려는 필요가 발생한 것이다.

[0177] SC는, 보통 커패시터보다 더 높은 정전용량을 가지며 그보다 백배 내지 천배 더 빠르게 재충전될 수 있는 EESD를 이룰 수 있다. 일부 슈퍼커패시터는 10 kW/kg을 초과하며; 현행 리튬-이온 배터리보다 10배 더 큰 출력 밀도를 함유할 수 있다. 충전 및 방전 속도가 화학 반응에 의해 제한될 수 있는 배터리와 달리, 슈퍼커패시터는 매우 가역적인 이온 흡수 및/또는 산화환원 반응을 통해 전하를 저장하고, 이는 빠른 에너지 포획 및 전달을 가능하게 할 수 있다.

[0178] 슈퍼커패시터는 높은 출력 밀도 및 탁월한 저온 성능을 나타낼 수 있고, 따라서, 휴대용 전자 장치, 의료 장치, 예비 전력 장치, 플래쉬 카메라, 공장, 회생 제동 시스템 및 하이브리드 전기 차량과 같은 적용에서 에너지 저장 자원으로서 사용되었다. 높은 출력 밀도는 신생 스마트 전기 그리드의 부하 평준화, 플래쉬 충전 전자기기 및 전기 차량의 급가속과 같은, 특히 거대한 양의 에너지가 제한된 시간 내에 저장 또는 방출되는 조건에서, 계속해서 더욱 주목받을 것이다.

[0179] SC는 전기 차량 (EV), 하이브리드-EV (HEV) 및 플러그-인 하이브리드-EV (PHEV)을 위한 이상적 에너지 저장 기술을 나타낼 수 있다. 일부 현행 슈퍼커패시터가 에너지 밀도에서 상당한 이득을 보이지만, 이들 장치는 시간 경과에 따라 출력 및/또는 사이클링 능력의 손실을 나타낼 수 있다. 추가적으로, 오늘날의 배터리 기반 EV의 중요한 결점은 그의 배터리 팩을 완전히 재충전하는데 약 1시간 이상을 필요로 하며, 이는 기체 탱크를 충전하는데 필요한 시간 (약 5분) 및 이동중 재충전을 위해 허용되는 시간의 주기를 초과한다. 이에 따라, SC의 제작은 출력 밀도를 크게 증가시키며, 재충전 시간을 수 자릿수만큼 단축시키고, 따라서 EV의 유용성을 증가시킬 수 있다. 추가적으로, 보다 더 높은 출력 밀도를 갖는 SC는 또한 에너지 제동 재수거 또는 급가속 동안 피크 출력을 효율적으로 흡수할 수 있다. 이러한 SC는 종래 배터리와 조합되어 종래 배터리에 대한 고-출력 스트레스를 크게 감소시키고, 따라서 그의 수명, 강건성 및 안전성을 증가시킬 수 있다. 이에 따라, 에너지 밀도를 갖는 SC의 제작은 EV를 위한 이상적인 에너지 저장 해결책을 제공할 수 있다.

[0180] 일부 실시양태에서, 슈퍼커패시터 (SC) 또는 전기화학 커패시터는 전형적으로 2개 이상의 전극으로 구성되는 에너지 저장 장치이며, 여기서 각각의 전극은 이온-투과성 막 (분리기)으로 분리되고, 여기서 전해질이 이온적으로 전극들을 연결시켜, 전해질 중 이온이 이중 전기적 극성 층을 형성하여, 전극이 인가된 전압에 의해 분극화될 때 전극의 극성을 반대로 만든다. 전지 내에 전자가 활성 물질을 떠나고 산화가 발생하는 전기화학 전지의 전극은, 애노드로 지칭될 수 있다. 전지 내에 전자가 활성 물질에 들어가고 환원이 발생하는 전기화학 전지의 전극은, 캐소드로 지칭될 수 있다. 각각의 전극은 전지를 통한 전류의 방향에 따라 애노드 또는 캐소드가 될 수 있다.

[0181] 전극 물질은 슈퍼커패시터의 에너지 저장 성능에 강하게 영향을 미칠 수 있다. SC에서의 에너지 저장이 표면 전하 흡수에 의존하기 때문에, 고성능 SC 전극은 높은 이온-접근가능 표면적, 높은 전기 전도성, 높은 이온 수송 속도, 및 높은 전기화학 안정성을 요구할 수 있다.

[0182] 일부 실시양태에서, SC 전극은 활성 물질 및 집전체 기판을 포함한다. 활성 물질의 질량 백분율은 전형적으로 전체 장치의 약 35-40%이다. 활성 물질이 전형적으로 다공성이고, 따라서 취성이며 불량한 도체이므로, 집전체는 지지 구조 및 슈퍼커패시터의 저항을 감소시키는 전도성 경로로서 사용될 수 있다. 일부 실시양태에서, SC는 높은 정전기적 정전용량을 나타내는 1개의 전극 및 높은 전기화학 정전용량을 나타내는 또 다른 전극을 포함하는 하이브리드 SC이다.

[0183] 일부 실시양태에서, 집전체는 탄소 클로스 규소, 금속 산화물, 비소화갈륨, 유리, 스틸, 스테인레스 스틸 또는 그의 임의의 조합으로 구성된다. 일부 실시양태에서, SC 집전체는 응력 하에 구부러지고 휘어지도록 설계된다. 오늘날 이용가능한 최신기술의 SC는 다공성 활성탄 전극을 사용하여 구성될 수 있다.

[0184] 애노드가 전형적으로 하이브리드 SC 충전 동안 리튬화를 겪기 때문에, 보다 낮은 애노드 리튬화 전압은 보다 큰 장치 전압 윈도우를 제공하고, 따라서 보다 높은 SC 에너지 밀도를 제공할 수 있다. 이와 같이, SC의 애노드의 사이클링 안정성은 종종 SC 장치의 사이클링 수명에 대한 제한 인자일 수 있다. 따라서, 하이브리드 SC 시스템의 이상적 애노드는 장치가 전해질의 전압 윈도우를 완전히 사용하여 높은 에너지 밀도를 제공하도록 낮은 동작 전압을 나타낼 수 있다. 추가적으로, 애노드가 높은 비용량 및 에너지 밀도를 가지고 있어야 하고, 고-출력 캐소드에 비해 탁월한 레이트 능력을 가져, 높은 출력 밀도를 달성해야만 한다. 최종적으로, 애노드는 긴 사이클링 수명을 나타내어 하이브리드 시스템의 사이클링 안정성을 향상시켜야 한다. 이상적 캐소드는 높은 동작 전

압, 높은 비용량 및 우수한 레이트-능력을 가지고 있어야 한다.

[0185] 그래핀 물질은 양극 (방전 동안 캐소드), 음극 (방전 동안 애노드) 또는 둘 다에 제공될 수 있다. 그래핀은 그의 단일 원자 두께, 높은 이론적 비표면적 (약 2,630 m^2/g), 높은 이론적 중량측정 정전용량 (약 550 F/g), 높은 고유 전기 전도성, 탁월한 기계적 가요성, 및 예외적 전기화학 안정성 때문에 SC 전극 이상적 재료를 나타낼 수 있다. 그러나, 그래핀 시트 사이의 강한 π-π 상호작용으로 인해, 그래핀 플레이크는 이들이 벌크 전극으로 가공될 때 재적층되어 흑연-유사 분말 또는 필름을 형성하는 경향이 있을 수 있다. 이 재적층은 접근가능한 표면적 및 이온 확산 속도를 상당히 감소시키고, 따라서 전극의 중량측정 정전용량 및 충전/방전율을 손상시킬 수 있다.

[0186] 그러나, 활성화 방법을 사용하여 초소형 마이크로포어 및 초고 비표면적을 갖는 활성화된 그래핀을 제조할 수 있다. 그러나, 이러한 미세다공성 표면은 전해질 이온 접근의 감소된 효율로 인해 전극의 중량측정 정전용량을 제한할 수 있다. 레이저-스크라이빙 방법을 사용하여, 접근가능한 표면적을 증가시키고 중량측정 정전용량을 상승시키는 다공성 구조의 형성을 통해 온-칩 마이크로 슈퍼커패시터에 대한 이들 문제점을 완화시킬 수 있지만, 이 레이저 스크라이빙 접근법의 고유 규모는 수송 및 재생가능한 에너지 저장과 같은 이러한 적용을 위한 보다 큰 에너지 장치를 형성하는데 불충분할 수 있다.

[0187] 도 1에 따라, 본 개시내용의 실시양태는 10-100 배 더 높은 출력 밀도를 보유하면서 납산 및 Li-이온 배터리에 필적하는 에너지 밀도를 갖는 SC에 관한 것이다. 전기 차량 (EV), 하이브리드 전기 차량 (HEV) 및 플러그-인 하이브리드 전기 차량 (PHEV)의 적용을 위한 USABC/프리덤 카 (Freedom CAR)에 의해 규정된 벤치마크 성능 목표에 비해, 본 개시내용의 실시양태는 높은 에너지 밀도를 유지하면서 보다 더 높은 출력 밀도를 실현하며, 이는 그 적용의 표적 목표에 특히 바람직하다. 따라서, 본 개시내용의 실시양태는 EV 또는 전기 비행기와 같은 제품에서, 에너지 저장 기술 풍경을 변형시키는 SC를 제공한다.

[0188] 종래 장치의 경우, 전형적으로 출력 밀도가 증가함에 따라 에너지 밀도는 현저하게 감소한다는 것이 제시된 바 있다. 현행 하이브리드 SC는 높은 에너지 및 높은 출력 밀도 뿐만 아니라 긴 사이클 수명을 나타낼 수 있지만, 그의 능력은 낮은 고유 전기 전도성, 리튬화/탈리튬화 과정 동안 큰 부피 변화, 불안정한 고체 전해질 계면 (SEI), 및 이에 따른 불량한 사이클링 안정성 및 레이트-능력을 나타낼 수 있는 현행 애노드에 의해 제한될 수 있다.

[0189] 전극 내에 공극-쉘 구조는 충전 및 방전 동안의 부피 변화에 대응하고 불안정한 고체 전해질 계면 (SEI)의 형성을 방지함으로써, 이들 결점을 해결할 수 있다. 그러나, 요크-쉘 구조를 합성하기 위한 현행 최신기술 템플릿-보조 절차는 다단계이고, 시간-소비적이고, 비싸고, 규모화가 곤란하며, 독성 화학물질을 요구한다. 그러나, 화학적으로 환원된 구멍이 많은 3차원 그래핀 프레임워크 (3DGF) 또는 구멍이 많은 3차원 그래핀 프레임워크 (H3DGF)는 효과적인 해결책을 제공하여 이들 문제점을 극복하고, 대-규모의 고성능 SC 전극의 제조를 가능하게 한다.

[0190] 이와 같이, SC는 3DGF 또는 H3DGF 기반 SC 전극의 제조 및 능력을 최적화하고 규모화하도록 설계되었다. 3DGF 및 H3DGF는 스캐폴드로 사용되어 높은 에너지 밀도 하이브리드 슈도-커패시터 (PC)을 위한 복합 전극을 생성하였다. 완전 출력 밀도 전지는 오늘날의 Li-이온 배터리에 접근하거나 심지어 초과하는 에너지 밀도로 제조되었다.

[0191] 본 개시내용은 SC 장치를 개발하는 것에 관한 것이다. 본원에 기재된 파괴적 에너지 저장 기술은 상업용 규모에 활용가능하며, 첨단 EESD 기술의 개발 및 전개로 이어진다. 본원에 기재된 SC는 1개 이상의 적용 또는 영역, 예컨대, 예를 들어, 휴대용 전자기기 (예를 들어, 휴대전화, 컴퓨터, 카메라 등), 의료 장치 (예를 들어, 박동조율기, 제세동기, 보청기, 통증 관리 장치 및 약물 펌프를 포함하는 수명-유지 및 생명 증진 의료 장치), 전기 차량 (예를 들어, 긴 수명을 갖는 EESD는 전기 차량 산업을 증진시키는데 요구됨), 우주 (예를 들어, EESD는 로버, 착륙선, 우주복 및 전자 장비를 포함하여 우주 시스템에 동력을 공급할 수 있음), 군용 EESD (예를 들어, 군은 특정한 EESD를 수많은 전자기기 및 장비에 동력을 공급하는데 사용하고; 본원에 기재된 EESD의 감소된 질량/부피는 매우 바람직함), 전기 항공기 (예를 들어, 태양 전지 또는 EESD에서 나오는 전기에 의해 내연 기관보다는 전기 모터로 구동하는 항공기), 그리드 스케일 에너지 저장 (예를 들어, EESD는 (발전소로부터의) 생산이 소비를 초과하는 시간 동안 전기 에너지를 저장하는데 사용될 수 있고, 소비가 생산을 초과하는 시간에서 저장된 에너지가 사용될 수 있음), 재생가능한 에너지 (예를 들어, 태양이 밤에 빛나지 않고 바람이 항상 불지는 않기 때문에, 그리드 출력 시스템을 끈 EESD는 일몰 후의 시간 동안 및 바람이 불지 않을 때 사용하기 위한 재생가능한 에너지원으로부터 과잉 전기를 저장할 수 있고; 보다 높은 출력 EESD는 현행 최신기술 EESD보다 더 높

은 효율로 태양 전지로부터 에너지를 수거할 수 있음), 전동 공구 (예를 들어, 본원에 기재된 EESD는 고속-충전 무선 전동 공구 예컨대 드릴, 스크류드라이버, 톱, 렌치 및 분쇄기를 가능하게 하고; 현행 EESD는 긴 재충전 시간 가짐), 또는 그의 임의의 조합에서 중요한 역할을 한다.

[0192] 3D 그래핀 프레임워크

[0193] 도 2의 (a)에 따라서, 저-패킹-밀도 물질로 형성된, 매우 다공성인 활성화 3D 그래핀 프레임워크 (3DGF)(201a)가 사용되어 전극에 큰 비표면적 및 높은 중량측정 정전용량을 제공하지만, 그의 높은 이온 확산으로 인해 이러한 전극은 낮은 패킹 밀도 및 이에 따른 낮은 부피측정 정전용량을 유지할 수 있다. 게다가, 활성화 3DGF(201a)가 풍부한 빈 공간을 나타내지만, 그 안의 요구된 큰 부피의 전해질은 장치의 총 질량을 증가시키고, 따라서 장치의 총 질량에 의해 정규화하면 총 에너지 밀도를 감소시킬 수 있다. 이에 따라, SC 전극은 높은 중량측정 및 높은 부피측정 정전용량을 동시에 달성하면서 탁월한 레이트 능력을 유지하도록 설계되어야 한다. 대안적으로, 도 2의 (b)에 따라서, 압착되고 활성화된 3DGF(201b)는 상승된 부피측정 정전용량 및 감소된 이온-접근가능한 표면적 및 이온 확산 속도를 나타내고, 따라서 보다 낮은 중량측정 정전용량 및 불량한 레이트 성능을 나타낸다. 예를 들어, 레이저-스크라이빙된 다공성 그래핀 전극은 약 0.05 g/cm^3의 보다 낮은 패킹 밀도 및 결과적으로 높은 중량측정 성능 및 낮은 부피측정 정전용량을 나타낼 수 있다. 그러나, 진공 여과 및 모세관 압축을 통한 3DGF 압착은 부피측정 정전용량 (< ~200 F/cm^3)을 크게 향상시키면서 보통의 중량측정 정전용량 (~167 F/g)을 유지한다.

[0194] 3DGF의 형태인 구멍이 많은 3D 그래핀 프레임워크 (H3DGF)(202a)는 이상적인 SC 전극 물질을 나타낸다. H3DGF(202a)는 다공성 구조를 갖는 3D 네트워크로 구멍이 많은 그래핀 시트들을 결합시킴으로써 획득될 수 있다. 도 2의 (b)에 따라서, 압축된 H3DGF(202b)의 그래핀 시트의 매우 상호연결되고 상호결합된 3D 네트워크 구조는 재적층을 방지하고, 높은 비표면적을 갖는 매우 다공성 모놀리식 (monolithic) 구조로서 작용하여 직접적으로 임의의 결합제 첨가제 없이 전극으로서 사용될 수 있다. H3DGF(202a, 202b)의 나노포어는 추가로 그의 비표면적을 증가시킨다.

[0195] 초소형 마이크로포어가 전해질 이온에 의해 접근하기에 곤란할 수 있는 활성화 3DGF(201a)와는 달리, 비압축된 H3DGF(202a) 또는 압축된 H3DGF(202b)는 개방 채널의 연속적인 네트워크를 형성하는 충분히 크고 잘 통합된 세공의 계층을 나타내고, 그의 전체 표면적은 그를 통한 효율적 이온 수송을 위해 전해질에 의해 완전히 습윤화되고 전해질 이온에 의해 접근가능할 수 있다. 일부 예에서, 상호결합된 그래핀 시트를 갖는 압축된 H3DGF(202b)는 기계적으로 압착되어 그래핀 시트의 완전한 재적층 없이, 자립형 전극을 형성하여, 그의 초기 용매화 상태를 유지하면서 높은 패킹 밀도를 달성한다.

[0196] 예시적인 비압축된 H3DGF(901) 및 예시적인 압축된 H3DGF(902)의 측면도 및 단면도는 도 9에 따라 도시된다. 활성화 그래핀 필름과는 달리, H3DGF의 나노포어는 그래핀 층 사이에 이온 확산 최단로로서 기능하기에 충분히 크고, 따라서 전체 프레임워크를 가로질러 이온 수송을 증가시키고, 전체 표면적에 이온 접근을 용이하게 한다. 이에 따라, H3DGF는 높은 전기 전도성을 나타내고, 따라서 추가의 전도성 첨가제 없이 SC 전극으로서 직접 사용될 수 있다.

[0197] 현재 이용가능한 그래핀 전극의 비표면적은 단일-층 그래핀의 이론 값 (약 2,630 m^2/g)의 약 40-60%이다. 높은 표면 및 이온-접근가능한 비표면적을 갖는 본원에 기재된 바와 같은 H3DGF는 그래핀 시트의 크기 및 밀도를 증가시키고, 그의 어셈블리 및 세공 계층, 그 안에 나노포어를 최적화하도록 그래핀 시트의 크기 및 두께를 조정함으로써 형성하였다. 이에 따라, H3DGF의 비정전용량은 그의 비표면적에 비례하기 때문에, 또한 H3DGF의 효율적 다공성은 높은 이온 확산 속도를 가능하게 하기 때문에, H3DGF 전극은 약 1,250-2,000 F/g의 비정전용량을 나타낸다.

[0198] 일부 실시양태에서, 높은 전기화학 활성 표면적 및 탁월한 전자 수송 속도를 갖는 기계적으로 강건한 3DGF 및 H3DGF는 복합 전극 내에 작용하는 강건한 전도성 스캐폴드로서 기능하여 전기화학적으로 활성인 용량성 또는 슈도-용량성 물질, 예컨대 규소 (Si), 황 (S) 또는 전이 금속 산화물 (TMO)을 지지하고, 추가로 SC, 슈도-커패시터 (PC) 또는 임의의 다른 EESD의 에너지 밀도를 증가시킬 수 있다. 이러한 용량성 또는 슈도-용량성 복합 전극은 높은 이론 용량을 나타내며, 여기서 애노드 복합 재료, 예컨대 규소 및 TMO, 및 캐소드 복합 재료, 예컨대 황은 각각 낮은 전압 플래토 및 높은 전압 플래토를 나타낸다. 이 때문에, 본원에 기재된 바와 같이 매우 균일한 방법으로 3DGF 또는 H3DGF 스캐폴드 상에 또는 내에 나노규모 전기화학 활성 물질 (예를 들어, TMO 또는 S

i)을 로딩하고, 효율적 전자 및 이온 수송을 동시에 보장하는 신뢰할만한 접근법을 개발하는 것이 바람직하다.

[0199] 복합 애노드 및 탄소질 캐소드를 통합한 SC는, 본원에 기재된 바와 같이, 높은 에너지 밀도 및 높은 출력 밀도를 나타낸다. 그러나, 현행 하이브리드 슈퍼커패시터는 패러데이 리튬 삽입 반응을 사용하는 TMO 애노드와, 전해질 이온의 물리적 흡착/탈착을 통해 전하를 저장하는 표준 캐소드 사이의 동역학적 미스매치에 의해 손상될 수 있다. 다른 한편으로는, 나노구조 전극 물질의 고표면적 및 효율적 로딩을 나타내는 본원에 기재된 바와 같은 3DGF 및 H3DGF는, 그래핀 네트워크를 통한 높은 전자 전도성 및 초소형 TMO 입자 내의 빠른 이온 수송을 동시에 보장한다. 따라서, 본원에 기재된 바와 같은 3DGF-TMO 및 H3DGF-TMO 복합 애노드는, 2개의 비대칭 전극 사이의 동역학적 갭을 완화함으로써, 향상된 레이트-능력 및 사이클링 안정성을 나타낸다.

[0200] TMO 기반 애노드 물질은 전형적으로 상대적으로 높은 전압 플래토를 나타내고, 이는 작동 전압 윈도우 및 이에 따른 하이브리드 전지의 에너지 밀도를 제한한다. 따라서, 본원에 기재된 바와 같이, 보다 낮은 전압 플래토를 갖는 최적의 애노드 물질, 예컨대 Si가 사용되어 현저하게 높은 에너지 밀도를 갖는 SC를 형성하였다.

[0201] 리튬 황 (Li-S) 배터리는 차세대의 EESD 기술을 대표한다. 약 1,675 mAh/g의 이론 용량에 의해, 황은 에너지 밀도가 높고, 지속성이 길고, 저렴한 전기 에너지 저장 장치 (EESD)를 위한 매력적인 캐소드 복합 재료를 나타낸다. 그러나, 현행 Li-S 배터리는 황의 고유의 특성 때문에, 낮은 황 활용 및 불량한 장기 사이클링 거동을 나타낼 수 있다. 첫번째로, 황이 전기적으로 절연성이고, 불량한 전기 전도성을 나타내고, 충전 및 방전 동안 동적 팽창을 겪기 때문에, 복합 전극에서의 사용은 종종 전도성 첨가제 (예를 들어, 흑연) 및 결합제를 요구하고, 이의 중량은 저장 용량에 기여하지 않고 따라서 전극의 에너지 밀도를 감소시킨다. 두번째로, 황 캐소드는 방전 동안 Li_2S의 형성시 큰 부피 팽창 (최대 약 80%) 및 마찬가지로 충전 동안 수축을 겪을 수 있고, 이는 복합 전극의 높은 내부 변형 및 잠재적 붕괴를 일으킨다. 그러나, 팽창 및 수축에 의해 초래된 용량 저하는 전극의 다공성을 증가시키는 것을 통해 완화될 수 있다. 최종적으로, 충전/방전 사이클 동안, 전해질 중에 가용성인 장쇄 리튬 폴리술피드 (Li_2Sn, $4 \leq n \leq 8$)를 형성하고, 이는 리튬 애노드로 확산되고, 그에 침착되어 (즉, 폴리술피드-왕복 공정) EESD의 성능을 떨어뜨릴 수 있는 반응이 발생한다.

[0202] 최대 60 중량%의 황을 통합한 이전 SC 전극이 다양한 결점을 나타내지만, 3DGF 및 H3DGF는 그의 높은 다공성, 높은 표면적, 높은 전기 전도성 및 효율적 이온 수송 때문에 S 나노입자의 효율적 로딩을 위한 이상적 전도성 스캐폴드를 나타낸다. 도 5는 예시적인 H3DGF-S 복합체(500)의 구조를 개략적으로 설명하며, 반면에 고도로 상호연결된 H3DGF 시트에 의해 형성된 연속적 전도성 네트워크가 황의 절연 특성을 극복할 수 있는 효율적인 고전도성 전자 수송 경로를 형성한다. 추가로, 개별 그래핀 시트가 결합되고 함께 상호결합되어 모놀리식의 기계적으로 강한 3D 네트워크를 형성하기 때문에, 충전/방전 사이클에서 S-전극의 반복 팽창 및 수축을 견디는데 결합제가 요구되지는 않는다. 추가적으로, 본원에 기재된 바와 같은, 3DGF 및 H3DGF의 고도의 다공성 구조는, 활성 황의 효율적 도입을 허용하여 캐소드의 질량의 최대 약 80-90%까지 높은 황 함량을 형성한다. 최종적으로, 그래핀 시트는 황 입자를 감싸고 캡슐화할 수 있고, 이에 따라 폴리술피드 왕복 공정을 억제하고 탁월한 사이클링 성능을 갖는 강건한 전극을 제공할 수 있다.

[0203] 3D 그래핀 프레임워크의 형성 방법

[0204] 3DGF 및 H3DGF는 그래핀 옥시드 (GO)로 제조될 수 있다. 이와 같이, 고성능 3DGF-SC 및 H3DGF-SC의 상업용 규모 제조에 대한 주요 장애물은 GO 제조의 신뢰할 수 있고 규모화할 수 있는 방법의 개발일 수 있다. GO를 제조하는 종래 방법은 변형된 허머법이고, 이는 환경적으로 위험한 중금속, 유해한 기체, 폭발 위험, 긴 반응 시간 및 pH 중성화를 위한 지루한 투석 과정을 수반할 수 있고, 따라서 광범위한 적용에 대해 엄청난 비용이 들 수 있다. GO 및 환원 GO (rGO)의 현행 대규모 제조 방법의 품질 (예를 들어, 최대 1,200톤/년)은 고성능 EESD에서 사용하기에 적합하지 않으므로, 규모화할 수 있는 GO 제조를 위한 친환경의, 안전한, 고도로 효율적 및 저-비용의 접근법에 대한 현재 미충족 필요가 존재한다. 일부 예에서, 우세하게 사용된 $KClO_3$ 및 $KMnO_4$에 대한 대안적 산화제 예컨대 K_2FeO_4가 덜 휘발성 및 독성인 효율적 산화제로서 사용되고, 실온에서 약 1시간, 및 대규모로 GO를 제조하였다. 추가적으로, GO의 대안적 상업적 공급원은 평가되고 사용될 수 있다.

[0205] 3DGF 및 H3DGF 기반 EESD의 성능은 그의 표면적 (층수) 및 그의 전도성 (산화/환원도)에 따라 매우 달라진다. 단일 층의 우세 및 산소 기의 최소 개수를 나타내는 GO 및 rGO는 각각 최고 용량 및 전도성을 나타낸다. 따라서, 산화도는 생성된 rGO에서의 결함 부위의 개수, 및 HGF의 전도성에 직접적으로 상호관련된다. rGO에서 완전한 산소 기 제거, 및 π-π 결합의 전체 복원은 제조 방법을 조정하고 최적화함으로써 달성되었다.

[0206] 일부 예에서, GO 현탁액은 천연 플레이크 흑연을 사용하는 허머법에 의해 합성되며, 여기서 현탁액 중 GO의 농도는 약 2.3 g/L이고, 여기서 GO 현탁액은 약 24시간의 시간 주기 동안 약 95℃의 온도에서 건조된다.

[0207] 도 6에 따라서, 예시적인 H3DGF는 수성 분산액 중 그래핀 옥시드 (GO)(601) 또는 구멍이 많은 GO (HGO)(602)의 동시 환원 및 결합을 통해 제조되어 예시적인 거시적 구멍이 많은 그래핀 히드로겔 (HGH)(603) 또는 용매화 H3DGF를 형성하였다. HGH(603)의 거시적 크기는 GO(601)의 농도를 제어함으로써 조정되며, 여기서, 예를 들어, 더 낮은 농도의 GO(601)를 갖는 수성 분산액은, 더 높은 농도의 분산을 갖는 수성 분산액으로부터 제조된 것들보다 더 큰 마이크로포어를 갖는 상당히 더 큰 HGH(603)을 생성하였다. 이런 방식으로, 본원에 기재된 바와 같이 HGH(603)의 거시적 크기 뿐만 아니라 마이크로포어 크기가, 생성된 H3DGF의 표면적을 최대화하도록 조정되며, 전극으로서 결합제-무함유 사용을 위한 히드로겔의 기계적 강건성을 유지하였다.

[0208] 추가적으로, 그래핀 시트의 바닥면의 나노포어의 크기는 산소, 오존, 과산화수소, 플루오라이트 디옥시드, 리튬 퍼옥시드, 바륨 퍼옥시드, 플루오린, 염소, 질산, 니트레이트 화합물, 황산, 퍼옥시이황산, 퍼옥시일황산, 클로라이트, 클로레이트, 퍼클로레이트, 할로겐 화합물 하이포클로라이트, 하이포할라이트 화합물, 가정용 표백제, 6가 크로뮴 화합물, 크로뮴산, 디크로뮴산, 삼산화크로뮴, 피리디늄 클로로크로메이트, 크로메이트 화합물, 디크로메이트 화합물, 퍼망가네이트 화합물, 과망가니즈산칼륨, 과붕산나트륨, 아산화질소, 질산칼륨, 비스무트산나트륨 또는 그의 임의의 조합을 포함하는 산화제의 다양한 농도에 GO의 노출의 주기를 제어함으로써 조정하였다. 이와 같이, GO가 산화제에 보다 길게 노출되거나, 또는 산화제의 농도가 높을 수록, 그래핀 시트 내에 형성된 나노포어는 더 크다. 따라서, 이온 확산 속도는, 본원에 기재된 바와 같이, 나노포어의 크기 및 밀도를 최대화함으로써 최적화하였다. 추가로, 나노포어가 환원 전에 GO 상에 형성된 3DGF 또는 H3DGF는 나노포어가 환원 후에 GO 상에 형성된 3DGF 또는 H3DGF보다 더 적은 강건성을 나타냈다.

[0209] 3DGF 또는 H3DGF 기반 전극의 전기화학적 성능은, 본원에 기재된 바와 같이, 추가로 그래핀 시트의 배열/위상을 변형함으로써 최적화하였다. 예를 들어, 수직으로 정렬된 그래핀 시트는 3DGF 또는 H3DGF의 레이트 능력 및 비정전용량을 개선한 빠른 수송 경로를 제공한다. 그래핀 네트워크의 정렬은 결합 전에 적절한 액정 상 (예를 들어, 네마틱)으로 GO의 배열을 제어함으로써 조정되어 3DGF 또는 H3DGF를 형성하였다. 일부 예에서, 외부 힘, 예컨대 전기장, 유체 압력, 유체 와류, 자장 또는 기계적 변형을 사용하여 3DGF 또는 H3DGF에서 GO 액정의 거시적 정렬 및 그래핀 시트의 조직화를 조정하였다.

[0210] 일부 예에서, HGO는 GO, 및 산소, 오존, 과산화수소, 플루오라이트 디옥시드, 리튬 퍼옥시드, 바륨 퍼옥시드, 플루오린, 염소, 질산, 니트레이트 화합물, 황산, 퍼옥시이황산, 퍼옥시일황산, 클로라이트, 클로레이트, 퍼클로레이트, 할로겐 화합물 하이포클로라이트, 하이포할라이트 화합물, 가정용 표백제, 6가 크로뮴 화합물, 크로뮴산, 디크로뮴산, 삼산화크로뮴, 피리디늄 클로로크로메이트, 크로메이트 화합물, 디크로메이트 화합물, 퍼망가네이트 화합물, 과망가니즈산칼륨, 과붕산나트륨, 아산화질소, 질산칼륨, 비스무트산나트륨 또는 그의 임의의 조합을 포함하는 산화제의 균질 수성 혼합물을 100℃에서 가열함으로써 형성할 수 있다. 일부 예에서, 잔류 산화제는 이어서 원심분리하거나, 또는 임의의 다른 분리 방법에 의해, 및 반응 혼합물을 세척함으로써 제거된다. 일부 예에서, HGO는 이어서 포름산, n-부탄올, 이소프로판올, n-프로판올, 에탄올, 메탄올, 아세트산, 물 또는 그의 임의의 조합을 포함하는 용매 중에 재분산시켜 안정한 수성 분산액을 고농도로 형성하였다. 이어서 HGO는 포름산, 아스코르브산, 아세트산, 트리클로로아세트산, 플루오린화수소산, 시안화수소산, 황화수소 또는 그의 임의의 조합을 포함하는 약산을 분산액 내로 도입함으로써 화학적으로 환원되고 결합되어 3DGF 또는 H3DGF를 형성할 수 있다. 본원에 기재된 바와 같은, 생성된 3DGF 또는 H3DGF의 측면 크기 및 두께는 다양한 크기의 반응 용기를 사용하고, HGO의 부피를 조절함으로써 조정하였다.

[0211] 3DGF 전극의 형성 방법

[0212] 현재, 고성능 그래핀 프레임워크 기반 SC 전극은 종종 오토클레이브에서 GO를 동시에 환원하고 결합하는 것을 포함하는 회분식 공정으로 형성되며, 이는 제조 처리량을 제한할 수 있다. 일부 실시양태에서, 더 효율적인 롤-투-롤 전극 인쇄 공정은 연속적 GO 환원 및 결합 방법, 특정한 화학적 배합 및 점도의 GO 잉크, GO-Si 잉크, GO-S 잉크 또는 GO-TMO 잉크의 후속 배합을 포함한다. 일부 실시양태에서, 도 3에 따라서, 연속적 롤-투-롤 인쇄/코팅 공정(300)은 적절한 용매 중에 GO 또는 HGO 전구체를 합성하고 분산시켜 GO 또는 HGO 잉크(302)를 생성하는 것, 집전체(301)를 제어된 온도에서 및 적절한 화학적 환경 내에서 GO 또는 HGO 잉크(302)로 코팅하는 것, 및 후속적으로 주위 조건 하에 화학물질, 열, 자발적 자기-어셈블리 또는 레이저 처리를 통해 집전체 상에 활성 물질을 환원하고 결합하는 것을 포함한다. 이러한 공정은 3DGF, 3DGF-Si, 또는 3DGF-S, 3DGF-TMO, H3DGF, H3DGF-Si, H3DGF-S 및 H3DGF-TMO SC 전극을 저렴하게, 일관되게 및 효율적으로 형성한다.

[0213] 고성능 3DGF 또는 H3DGF-SC의 상업용 규모 제조에 대한 추가의 장벽은 도 8에 따라서 코인(801) 및 파우치 전지(802) 사이의 크기 차이로부터 유래한다. 전형적인 상업적으로 입수가능한 코인 전지(801)의 직경은 약 10 mm인 반면, 전형적인 상업적으로 입수가능한 파우치 전지(802)는 측면 크기가 통상적으로 적어도 약 100-200 mm이다. 현행 그래핀 제조 방법은 전형적으로 GO의 동시 환원 및 결합을 위한 승온이 요구되므로, 둘 다의 SC 전지 규모를 위한 3DGF 또는 H3DGF 전극의 크기 및 형상을 제어하는 것은 곤란할 수 있다. 이에 따라, 본원에 기재된 바와 같은 3DGF 및 H3DGF 전극 제조 방법은 세밀하게 조정되어, 크고, 바람직하게는 자립형 그래핀 전극과 집전체 사이에 완벽한 접촉을 보장하였다. 큰 파우치 전지의 실연에 의해, H3DGF는 많은 상이한 유형의 상업적으로 관련된 장치에 적합할 수 있다.

[0214] 일부 예에서, 자립형 3DGF 또는 H3DGF는 스틸, 스테인리스 니켈, 알루미늄, 구리, 비스무트, 크로뮴, 코발트, 갈륨, 금, 철, 인듐, 납, 마그네슘, 수은, 은, 나트륨, 주석, 티타늄, 아연, 지르코늄, 브론즈 또는 그의 임의의 조합을 포함하는 금속성 발포체 집전체 상에 압축하였다. 일부 실시양태에서, 발포체 집전체는 2차원의 금속 호일 집전체보다 더 큰 3DGF/집전체 접촉 면적을 형성한다. 일부 예에서, 3DGF 또는 H3DGF는 제어된 조건(화학적 환원, 열 및/또는 레이저 환원 등) 하에 금속성 발포체 집전체 상에 직접적으로 침착 또는 인쇄하여, 최적의 결합/접촉을 위한 집전체 상의 GO의 직접 환원 및 3DGF 또는 H3DGF의 자기-어셈블리를 허용하였다. 금속 발포체가 금속성 호일보다 일반적으로 더 비싸기 때문에, 본원에 기재된 바와 같은 HGO는 또한 금속성 호일 집전체 상에 직접적으로 침착되거나 인쇄되었다. 일부 예에서, 이들 방법에 의해 형성된 전극은 3DGF 또는 H3DGF와 집전체 사이에 증가된 접촉 표면적을 나타내어 일관된 SC 대규모 제조가 허용된다.

[0215] 3DGF-Si 전극의 형성 방법

[0216] 일부 실시양태에서, 3DGF 또는 H3DGF 규소 복합체는 그의 충분한 빈 공간을 가지며, 부피 변화를 완충하고, SEI의 형성을 안정화하는 강건한 전도성 네트워크를 제공하여, 용량 저하를 완화하고, 과잉의 전해질 소진을 감소시키고, 레이트 성능을 개선한다.

[0217] 일부 실시양태에서, 고성능 3DGF 또는 H3DGF-Si 복합 전극을 구성하는 방법이 설계되어, 전극 물질의 응집을 방지하고, 그래핀 상에 나노규모 규소의 균일한 장식을 보장하고, 완충 공간을 제어하고, SEI 층을 안정화시켰다. 다중 관능기를 갖는 GO 및 rGO의 친양쪽성은 나노규모 규소 입자를 갖는 3DGF 또는 H3DGF의 어셈블리를 위한 다양한 잠재적 전략을 제공한다. 일부 예에서, 규소 나노입자는 그래핀 시트 상에 또는 단일 또는 이중 단계 자기-어셈블리 접근법을 통해 3DGF 네트워크 내로 로딩되어 높은 로딩 비를 보장한다. 본원에 기재된 바와 같은, 3DGF-Si 또는 H3DGF-Si 애노드의 장기 사이클링 안정성 및 고속 성능은 다양한 중합체 계면활성제/안정화제, 및 화학적으로 변형된 규소 표면 및 GO/rGO의 카르복실산 관능기 사이의 공유 결합을 사용하여, 3DGF 또는 H3DGF-Si에서 규소 나노구조와 rGO 사이의 반 데르 발스 힘 상호작용을 연구하는 것을 통해 평가되고 최적화된다. 보다 중요하게는, 충전/방전 사이클에서 규소의 큰 팽창 및 수축 동안 응력/변형을 완화하고 SEI 층을 안정화시키기 위해, 본원에 기재된 바와 같은, 조립된 그래핀의 강건성은 3D 그래핀 네트워크의 기계적 특성을 조정함으로써 연구하였다. 단일 층 그래핀이 약 1,100 GPa의 특이한 영 모듈러스를 나타내지만, 본원에 기재된 바와 같은, 조립된 그래핀 아키텍처의 기계적 특성은 그래핀의 특성 예컨대 사이클링 안정성 및 쿨롱 효율에 현저하게 영향을 미친 그의 두께, 크기, 정렬 및 어닐링 조건을 조정함으로써 최적화하였다.

[0218] 3DGF-S 전극의 형성 방법

[0219] 본원에 기재된 바와 같은, 높은 황 로딩 비를 갖는 전극은 요구되는 수동 전극 성분의 질량을 감소시켜 높은 전체 용량을 허용하고, 전극의 비용을 감소시킨다. 그러나, 과잉의 S-로딩은 3DGF 또는 H3DGF의 구조적 불안정성을 감소시키고, 전극의 전기 전도성을 손상시킬 수 있다. 도 4에 따라서, 예시적인 그래핀 시트(401) 상의 나노포어(402)는 탁월한 Li-이온 수송을 보장하도록 설계되고 제어되며, 보다 큰 폴리술피드 분자의 왕복 과정을 지연시킨다. 이에 따라, 본원에 기재된 바와 같이, 황을 3DGF 및 H3DGF의 3D 네트워크 내에 특정한 로딩 비로 균일하게 로딩하여 황의 전기화학 특성을 완전히 사용하였다.

[0220] 일부 예에서, 고성능 3DGF-S 또는 H3DGF-S 복합 전극을 구성하는 방법은 황, 산, 반응물 및 그래핀 물질, 예컨대 GO 또는 rGO를 혼합하여 용액을 형성하는 것, 및 반응물을 용액에 도입하는 것을 포함한다. 이에 따라, 반응물은 그래핀 물질을 환원시키고, 환원된 그래핀-함유 물질을 황 입자를 캡슐화하는 3DGF 또는 H3DGF에 결합시킨다. 일부 예에서, 산은 과염소산, 아이오딘화수소산, 브로민화수소산, 염산, 황산, p-톨루엔술폰산 메탄술폰산 또는 그의 임의의 조합을 포함하는 강산을 포함한다. 일부 예에서, 반응물은 포름산, 아스코르브산, 아세트산, 트리클로로아세트산, 플루오린화수소산, 시안화수소산, 황화수소 또는 그의 임의의 조합을 포함하는 약산을 포함한다. 일부 예에서, 황 공급원의 농도를 조정하여 3DGF 또는 H3DGF 복합체 내에 캡슐화된 황의 양을 제어

할 수 있다. 일부 예에서, 황 입자는 약 10 nm 내지 약 100 μm, 약 100 nm 내지 약 10 μm, 또는 약 500 nm 내지 약 10 μm의 크기를 갖는다. 이들 경우의 일부에서, 어떠한 추가의 결합제도 사용하지 않는다. 일부 예에서, 어떠한 추가의 전도성 첨가제도 사용하지 않는다. 이들 경우의 일부에서, 어떠한 추가의 결합제 또는 전도성 첨가제도 사용하지 않는다.

[0221] 일부 예에서, 전극의 총 중량에 대한 중량 또는 질량 백분율로 표시된, 전극의 황 함량은 약 60% 초과, 예컨대 약 65% 이상, 약 70% 이상, 약 75% 이상, 약 80% 이상, 약 85% 이상, 또는 약 90% 이상이다.

[0222] 일부 예에서, 고 용량 황 캐소드, 예컨대 고도로 효율적인 황 로딩을 갖는 자립형 3DGF 또는 H3DGF는 효율적 화학 반응을 포함하는 원-팟 방법을 통해 그래핀-기반 물질로부터 형성되며, 여기서 반응물은 단지 1개의 반응기에서 연속적 화학 반응에 적용될 수 있었다.

[0223] 도 7에 따라서, 예시적인 3DGF-S 복합 전극은 그래핀-함유 물질/공급원 (예를 들어, 그래핀 옥시드 (GO) 플레이크)의 존재 하에 황 전구체/공급원 (예를 들어, $Na_2S_2O_3$) 및 산 (예를 들어, HCl)을 혼합하여 하기 화학 반응을 개시하는 것을 포함하는 용이한 원-팟 합성에 의해 제조하였다:

[0224] $$Na_2S_2O_3 + 2HCl \rightarrow 2NaCl + SO_2 + H_2O + S$$

[0225] 이에 따라, GO의 환원을 일으키고 환원 GO를 캡슐화된 황 입자를 갖는 3D 그래핀 히드로겔에 결합시키는 아스코르브산의 도입은 3DGF-S 또는 3DGF-S 복합체를 유도한다. 도 7에 따라서, 예시적인 GO 용액(701)은 갈색빛 색을 나타내고, $Na_2S_2O_3$ 및 HCl을 갖는 GO의 예시적인 용액(702)은 우유빛의 탁한 현탁액을 나타내며, 이는 높은 개수의 황 입자의 존재를 나타낸다. 아스코르브산의 도입은 기계적으로 강한 자립형 3DGF-S 복합 히드로겔(703)의 형성을 허용한다. 반응 용액 내에 생성된 3DGF-S 복합 히드로겔은 자립형 구조 및 투명한 상청액을 나타내며, 이는 대부분의 GO 및 황 입자가 함께 결합하여 복합 히드로겔을 형성하였고 무시할 수 있는 GO 또는 황이 용액에 잔류했다는 것을 나타낸다. 이어서, 예시적인 3DGF-S 복합 히드로겔은 후속 사용을 위해 동결건조하였다. 이와 같은 약 70%, 약 80%, 약 90%, 및 약 95% 황 함량을 갖는 3DGF-S 복합체 (각각 3DGF-S70, 3DGF-S80, 3DGF-S90, 및 3DGF-S95로서 나타냄)를 제조하였다.

[0226] 본원에 기재된 바와 같은, 다양한 대안적 황 로딩 방법은 황 전구체 (예를 들어, $Na_2S_2O_3$)를 환원하는 것, 용융물 확산 접근법, CVD 접근법 및 히드로겔 상에 황 나노입자를 드롭 캐스팅하는 것을 포함하여 연구되고 평가되었다. 황 및 그래핀의 양을 조정하여 전극의 전체 구조의 로딩 비, 사이클성, 안정성 및 형상을 조절하였다. 본원에 기재된 바와 같이, 60-95%의 황 로딩 비를 용이하게 달성하였다.

[0227] 일부 예에서, 예시적인 3DGF-S90 전극은 농도가 약 1 M인 $Na_2S_2O_3$ 약 0.1 mL를 약 2.3 g/L GO 현탁액 약 0.22 mL, 및 탈이온수 약 0.58 mL와 혼합하여 제1 용액을 형성함으로써 형성하였다. 이어서, 약 2 M HCl 약 0.1 mL를 제1 용액에 적가하고, 생성된 용액을 약 2시간의 시간 주기 동안 교반하였다. 이어서, 약 1 M 아스코르브산 약 20 μL를 이전 용액에 첨가하고, 약 95℃의 온도에서 약 2시간의 시간 주기 동안 가열하여, 히드로겔을 형성하고, 여기서 히드로겔을 이어서 물로 수회 세척하고, 동결건조하였다. $Na_2S_2O_3$ 및 HCl의 양을 조절하여 동일한 방법을 사용하여 3DGF-S70, 80, 95, H3DGF-S70, 80 및 95를 합성하였다.

[0228] 3DGF-TMO 전극의 형성 방법

[0229] 그의 고표면적 및 전도성에 의해, 본원에 기재된 바와 같은 3DGF 및 H3DGF는 나노규모 TMO 로딩을 위한 효율적 스캐폴드를 형성하여, 그래핀 네트워크를 통한 효율적 전자 수송, 및 나노규모 TMO로의 초단 거리 및 빠른 이온 삽입을 동시에 보장한다.

[0230] 일부 예에서, 전극은 3DGF 또는 H3DGF 및 TMO의 층을 포함한다. 일부 예에서 TMO의 박층 (예를 들어, 약 10 nm)을 그래핀 시트 상에 균일하게 침착하여 높은 로딩 비 (약 80-90%), 매우 저항성인 TMO 내에 짧은 전자 및 이온 수송 거리, 및 그래핀-TMO 계면을 가로지르는 효율적 전자 수송을 보장하였다. 일부 예에서, 선택된 TMO (예를 들어, T- Nb_2O_5)를 TMO 나노결정의 직접적 핵형성 및 성장을 통해, 또는 졸-겔 침윤 접근법을 통해, 그의 3D 구조의 형성 전에, 그의 3D 구조의 형성 동안에 또는 그의 3D 구조의 형성 후에 그래핀 시트 상에 또는 3DGF 또는 H3DGF 내로 로딩하였다. 일부 예에서, 본원에 기재된 바와 같은, 복합 전극의 조성, 결정화도, 형태학 및 나노/마이크로-구조를 체계적으로 조정하여 전구체의 농도 또는 비, 및 결합 조건을 변경함으로써, 전극의 바람직한 전기화학 특성을 달성하였다.

[0231] 낮은 작동 전압을 갖는 수성 전해질을 사용하는 SC는 높은 에너지 밀도를 전달하지 못할 수 있다. 도 10에 따라서, 일부 TMO, 예컨대 TiO_2 및 T- Nb_2O_5가 비-수성 전해질에서 고유 삽입 슈도-정전용량을 나타낸다. 본원에 기재된 바와 같이, 유기 전해질 중에 탄소질 전극과 함께, 애노드 또는 캐소드에서의 이러한 TMO 전극 물질의 조합이 장치에 높은 에너지 및 높은 출력 밀도 둘 다를 제공한다. 그러나, 패러데이 리튬 삽입 반응을 사용하는 TMO 애노드와, 전해질 이온의 물리적 흡착/탈착을 사용하는 탄소질 캐소드 사이의 동역학적 미스매치는 고성능 TMO 복합체 SC의 제조에 대해 전위 장벽을 나타낼 수 있다. 이 때문에, 본원에 기재된 바와 같은 고-출력 애노드 물질로 상기 언급된 동역학적 갭을 완화시킨다. 일부 실시양태에서, 높은 전도성 및 고표면적을 나타내는, 3DGF 또는 H3DGF를 갖는 나노구조 TMO (예를 들어, T-Nb_2O_5)의 통합은 이와 관련하여 이상적인 해결책을 제공한다.

[0232] T-Nb_2O_5는 하이브리드 시스템에서 이상적 고-레이트 애노드 복합 재료인데, 이는 2-차원 수송 경로를 제공하는 슈도-용량성 메커니즘, 삽입시 작은 구조적 변화, 및 고체-상태 확산으로부터의 어떠한 제한도 없음을 나타내기 때문이다. 그러나, T- Nb_2O_5가 약 200 mAh/g의 상대적으로 낮은 이론 용량을 갖기 때문에, 본원에 기재된 바와 같이, 보다 높은 이론 용량을 갖는 대안적 TMO, 예컨대 Fe_3O_4를 사용하여 고용량 3DGF-TMO 또는 H3DGF-TMO 복합 애노드를 형성하였다. 이 경우에, 본원에 기재된 바와 같이, Fe_3O_4의 레이트-능력은 전도성 스캐폴드 상에 또는 내에 초미세 Fe_3O_4 나노입자를 로딩함으로써 완화될 수 있다.

[0233] 일부 실시양태에서, 전이 금속 산화물은 Nb_2O_5, Al_2O_3, V_2O_5, Re_2O_7, CrO_3, CeO_2, RuO_2, ZrO_2, MoO_3, WO_3, TiO_2 또는 그의 임의의 조합을 포함한다.

[0234] 전극 성능의 측정 방법

[0235] 일부 예에서, SEM JEOL 6700을 스캐닝 전자 현미경검사에 대해 사용하였다. 일부 예에서, TEM T12 퀵 CryoEM을 투과 전자 현미경검사에 대해 사용하였다. 일부 예에서, Cu K-알파 방사선을 갖는 패날리티컬 엑스퍼트 프로 X선 분말 회절계를 X선 회절 (XRD)에 대해 사용하였다. 일부 예에서, 액시스 울트라 DLD를 X선 광전자 분광분석법에 대해 사용하였다. 일부 예에서, TGA는 퍼킨엘머(PerkinElmer) 기기 피리스 다이아몬드 TG/DTA를 사용하여 수행하였다.

[0236] 일부 예에서, 전극의 전기화학 특성을 산소 함량이 0.1 ppm 미만으로 유지되는 물을 갖는 아르곤 충전된 글로브박스에서, CR2025 코인 전지 내로 전극을 조립함으로써 측정하였다. 일부 예에서, 약 100 μm의 두께를 갖는, 기계적으로 압축된 3DGF-S 샘플을 캐소드로서 직접적으로 사용한 반면, 리튬 호일을 애노드로서 사용하였다. 일부 예에서, 전극을 특징화하는데 사용한 전해질은 $LiNO_3$ (약 1 중량%)을 함유한 약 1:1 v/v 1,2-디메톡시에탄 (DME) 및 1,3-디옥솔란 (DOL) 중 리튬 비스(트리플루오로메탄술포닐)이미드 (약 1 M)의 용액을 포함하였다. 일부 예에서, 3DGF-90 캐소드는 약 0.636 cm^2의 면적 (약 9 mm의 직경을 갖는 디스크) 및 약 4.32 mg/cm^2의 황 질량 로딩을 나타냈다. 일부 예에서, 정전류식 충전/방전 사이클링을 약 1.6-2.6 V vs. Li/Li^+의 전위 범위에서 다중채널 배터리 측정 시스템 (LAND CT2001A)에 의해 수행하였다.

[0237] 일부 예에서, 전극의 전기화학 특성을 임의의 첨가제 없이 Li-S 배터리 캐소드에서 전극을 캐소드로서 사용함으로써 측정하였다.

[0238] 일부 예에서, 일부 실험에 사용된 예시적인 3DGF 또는 H3DGF 전극은 두께 약 140 μm 및 질량 로딩 약 10 mg/cm^2를 갖고, 이는 상업용 SC의 것과 비교가능하다.

[0239] 3DGF 및 H3DGF 기반 전극의 전기화학 특성을 수성 및 비-수성 전해질 둘 다에서 2 또는 3개-전극 구성을 사용하여 대칭 및 비대칭 SC 내에서 연구하였다. 완전한 전지 시험을 사용하여 비-수성 전해질 (예를 들어, EC/DMC의 혼합물 중 $LiPF_6$)에서 또는 이온성 액체 전해질 (EMIMBF_4/AN)에서 예시적인 하이브리드 슈퍼커패시터 (예를 들어, H3DGF-TMO/H3DGF)의 전체 에너지 밀도를 평가하였다.

[0240] 중량측정 정전용량을 전통적으로 성능-지수로서 사용하여 SC 전극을 평가하였지만, 부피측정 성능의 측정은 제한된 공간, 예컨대 휴대용 전자 제품 및 EV를 갖는 전기 에너지 저장 응용분야의 경우 중요한 측정기준이다. 그러나, 많은 전극은 여전히 그래핀의 중량측정 및 부피측정 정전용량 사이의 균형을 최적화하도록 설계한다.

[0241] 일부 실험 절차는 상대적으로 얇은 전극 (예를 들어, 100 nm)의 특성으로부터 장치 성능을 유도하며, 그의 활성

전극은 저활성 물질 질량 로딩을 갖는다. 그러나, 얇은 전극의 감소된 수직 이온 확산 거리로 인해, 이러한 얇은 전극 장치의 성능으로 항상 두꺼운 전극의 성능을 예상할 수 있는 것은 아니다. 이에 따라, 일부 예에서, 본 개시내용의 예시적인 적층 에너지 밀도를 상업용 장치와 비교가능한 크기 및 질량으로 실용적인 장치에 대한 실험에 의해 결정하였다. 이는 본원에 개시된 장치의 성능이 근본적으로 규모화가능하고, 이에 의해 실용적 적용 및 대규모 상업화에 특히 중요할 수 있음을 입증한다.

[0242] 예시적인 3D 그래핀 프레임워크의 성능 및 특성

[0243] 도 11은 높은 질량 로딩을 갖는 예시적인 H3DGF-Si 복합체의 SEM 영상을 나타낸다.

[0244] 비-H3DGF 3D 그래핀 프레임워크 내의 그래핀 상의 전구체를 통한 황 침착의 효과는 도 12의 (a)의 예시적인 H3DGF-S 및 도 12의 (b)에 따른 내부의 1-μm 황 입자의 단면 SEM 영상에 따라 보여진다.

[0245] 또한, 도 13의 (a)는 3DGF에서 캡슐화된 황 입자의 예시적인 저-배율 TEM 영상을 제공하고, 그래핀 포켓 내에서 용융된 황의 운동을 도시하는 반면, 점선은 그래핀 포켓의 벽을 나타낸다. 도시한 바와 같이, 예시적인 TEM의 강한 전자 빔 조사는 황 입자가 구리 그리드 상으로 누출하지 않고 3DGF 내에 동적으로 흐르도록 유도한다. 도시한 바와 같이, 용융된 황이 3DGF의 그래핀 벽-1(1301)을 가로질러 흐르지만, 이어서 3DGF의 그래핀 벽-2(1302)에 의해 정지하였다. 이에 따라, 이들 영상은 황이 3DGF의 다중-수준 포켓 및 벽 내에 잘 캡슐화되어 효율적으로 액체 황의 누출을 억제하거나 또는 완화시키는 것을 확인한다. 추가적으로, 방전 과정 동안 전해질에서 가용성 폴리술피드로의 황의 고체-액체 상 변환이, 관찰된 용융 공정과 유사하기 때문에, 3DGF 또는 H3DGF에 의한 황의 캡슐화는 폴리술피드 왕복 효과를 지연시키기 위한 효과적인 수단이다.

[0246] 도 14에 따라서, 예시적인 3DGF-S70, 80, 90 및 95 복합체의 단면도의 스캐닝 전자 현미경 (SEM) 영상은 유사한 마이크로미터-규모 다공성 구조, 및 약 1 μm의 비교가능한 황 입자 크기를 나타낸다. 예시적인 3DGF-S95 SEM 영상은 특징적인 기계적으로 취성인 구조를 나타내고, 황 입자는 대부분의 그래핀 시트를 덮는다. 황 로딩을 약 90%로부터 약 95%로 증가시키는 것이 황의 질량을 거의 두 배로 하는 것을 주목해야만 한다.

[0247] 일부 예에서, 도 15에 따라서, 약 70%의 로딩 백분율을 갖는 예시적인 H3DGF-S 캐소드는 약 1,252 mAh/g의 황-비용량을 나타낸다.

[0248] 도 16에 따라서, 환원 공정 및 3DGF-S 복합체의 형성 전후에 예시적인 3DGF-S90의 X선 회절 (XRD) 특징화는, 아스코르브산에 의한 환원 후에 감소하는 약 11.6° 에서의 초기의 넓은 GO 피크, 및 GO의 성공적 환원을 의미하는 약 22.2° 에서의 rGO 피크를 나타낸다. 예시적인 XRD 스펙트럼이, 환원 전후에, 사방정계 상 황 (JCPDS 08-0247)에 대해 잘 규정된 회절 피크를 나타내고, 이는 3DGF 내로 황의 성공적인 도입을 확인한다.

[0249] 도 17에 따라서, 열중량측정 분석 (TGA)는 복합 구조의 황 로딩을 결정한다. 예시적인 3DGF-S 복합체의 TGA 연구는 온도가 황 승화 온도에 상응하는 약 200℃를 초과하여 증가할 때 중량 감소를 나타낸다. 황 함량을 결정하기 위해, 황 없이 예시적인 순수한 3DGF에 대해 TGA를 수행하여 그래핀 자체로부터 중량 기여를 설명하였다. 중량 손실 보정 후에, 예시적인 샘플의 황 함량은 약 70%, 약 80%, 약 90%, 및 약 95%인 것을 결정하였다. 메틸렌 블루 흡수 시험은, 황을 포함한 및 포함하지 않은 3DGF의 표면적이 탄소의 양에 의해 정규화될 때 매우 비교가능하고 대략 900 m^2/g이며, 따라서 황의 함유물이 3DGF의 전체 구조에 유의한 영향을 미치지 않는 것임을 결정하였다.

[0250] 도 18에 따라서, 예시적인 3DGF-S 전극의 전기화학적 성능을 임의의 첨가제 없이 자립형 복합 캐소드로서 동결 건조된 3DGF-S의 적용을 통해 추가로 평가하였다. Li-S 배터리의 용량은 종종 황의 부피 또는 질량에 의해 정규화되지만, 황이 보다 적을수록 용량은 보다 높다고 예상될 수 있는 반면, 이들 예시적인 측정치가 결합제 또는 전도성 첨가제의 중량을 설명하지는 않는다. 이에 따라, 도 18a의 예시적인 측정치는 전극의 총 중량에 의해 정규화하고, 본원의 개시내용의 주요 성능 개선을 강조한다.

[0251] 도 18a에 따라서, 약 1.6-2.6 V (vs. Li^+/Li)의 전압 범위 하에, 0.1 C에서의 예시적인 3DGF-S90의 정전류식 시험 방전/충전 곡선은 약 2.32 V 및 약 2.08 V에서 플래토를 나타내고, 이는 장쇄 (Li_2S_x, $4 \leq x \leq 8$) 및 단쇄 폴리술피드 (Li_2S_2 또는 Li_2S)의 형성을 나타낸다. 그의 1번째 사이클의 사용에서, 3DGF-S90은 약 1,070 mAh/g의 용량을 나타낸다. 20번째 및 50번째 사이클의 사용에서의 방전/충전 곡선은 또한 2개의 플래토를 분명히 나타내고, 우수한 전기화학 안정성을 나타낸다. 도 18b 및 도 18c는 0.1 C에서의 예시적인 3DGF-S 샘플의 사이클링 능력을 설명하고, 각각 황 중량 및 전극의 중량에 의해 정규화된다. 도 18c에 따라서, 3DG-S90 캐소드는 다

양한 전류 레이트에서 우수한 사이클링 반응을 나타내고, 용량은 0.2 C에서의 657 mAh/g로 회복할 수 있다.

	황-비용량 (@ C-레이트= 0.1)	
	0 사이클에서	50 사이클에서
3DGF-S70	1,286	846
3DGF-S80	1,200	777
3DGF-S90	1,077	746
3DGF-S95	628	673

[0252]

[0253] 표 1 - 황-비용량의 비교

[0254] 표 1 및 도 18b에 따라서, 예시적인 3DGF-S70, 80, 90 및 95 전극을 위한 초기 용량은 각각 약 1,286 mAh/g, 약 1,200 mAh/g, 약 1,077 mAh/g 및 약 628 mAh/g이다. 예상한 대로, 보다 낮은 황 로딩은 보다 높은 황-비용량을 생성하는데, 이는 그래핀 프레임워크 내의 보다 적은 황이 보다 많은 전자 및 이온 수송 경로를 생성하고 따라서 황의 이익을 효율적으로 사용하기 때문이다. 50 사이클 후에, 3DGF-S70, 80 및 90 전극의 용량은 각각 약 846 mAh/g, 약 777 mAh/g 및 약 746 mAh/g으로 감소한다. 50 사이클 후의 약 673 mAh/g로의 3DGF-S95의 비용량의 점진적인 상승은 프레임워크에서 황에 의해 초래된 과도한 절연에 기인하고, 이는 깊게 매립된 황을 서서히 사용하기 위한 긴 활성화 과정을 요구할 수 있다.

[0255] 도 18d는 전체 전극의 질량에 의해 정규화된 예시적인 3DGF-S90 전극의 레이트 성능을 도시하는 반면, 0.2, 0.5, 1.0 및 2 C의 C-레이트에서의 초기 용량은 각각 약 772 mAh/g, 약 615 mAh/g, 약 500 mAh/g 및 약 381 mAh/g이다. 이에 따라, 약 1.0의 C-레이트에서의 3DGF-S90의 높은 고유 용량은 그 레이트에서 종래 리튬 이온 배터리의 것보다 더 높은, 한 자릿수 초과의 출력 밀도를 생성한다. C-레이트가 전형적으로 오직 황의 중량에 의해 정규화되지만, 본원에 보고된 출력 밀도는 전극의 총 질량에 의해 정규화됨을 주목하는 것이 중요하다. 3DGF-S90 캐소드는 다양한 전류 레이트에서 우수한 사이클링 반응을 나타내고, 용량은 0.2 C에서의 약 657 mAh/g로 회복할 수 있다. 도 18d는 1 C에서 3DGF-S90 캐소드의 장-수명 성능을 도시한다. 전체 전극 질량에 의해 정규화된 초기 비 방전 용량은 약 441 mAh/g이고, 이는 활성화 과정으로 인해 30 사이클 후에 약 473 mAh/g으로 서서히 증가하고, 500 사이클 후에 341 mAh/g이며, 이는 77%의 용량 유지 및 사이클당 약 0.052%의 용량 저하에 상응한다. 처음 10 사이클 동안 발생하는 초기 활성화 과정 후에, 쿨롱 효율은 일관되게 사이클 전반에 걸쳐 약 99.5%로 유지된다.

	3DGF-S90 용량[mAh/g]
	황-비용량 - 충전 (C-레이트 = 0.1)
0 사이클 후	1,077
10 사이클 후	824
20 사이클 후	790
50 사이클 후	746
	황-비용량 - 방전 (C-레이트 = 1)
0 사이클 후	441
30 사이클 후	473
500 사이클 후	341
	전극-비용량
C-레이트 = 0.1 에서	969
C-레이트 = 0.2 에서	772
C-레이트 = 0.5 에서	615
C-레이트 = 1.0 에서	500
C-레이트 = 2.0 에서	381

[0256]

[0257] 표 2 - 3DGF-S90 성능 능력

[0258] 3DGF-S90의 성능 특징은 상기 표 2에 열거된다. 요약하면, 본 개시내용은 원-팟 합성 방법을 사용하는 자립형 3D 그래핀-황 복합체의 설계 및 합성을 보고하였다. 매우 전도성의 상호연결되고 기계적으로 강한 3D 그래핀 및 동봉된 황 입자의 조합은, 전체 캐소드의 중량에 의해 정규화될 때, 0.1 C에서의 약 969 mAh/g의 최고 기록 용량, 및 사이클당 약 0.052%의 용량 저하를 갖는 1 C에서의 최대 500 사이클의 안정적 사이클링 내구성을 갖는

고성능 황-캐소드를 제조하였다. 이들 결과는 초고 황 함량을 갖는 자립형 3DGF가 매우 강건한 EESD로의 유망한 경로를 제공하는 것을 입증한다.

[0259] 3D 그래핀 프레임워크 전극을 갖는 예시적인 슈퍼커패시터의 성능 및 특성

[0260] 예시적인 SC를 본원에 기재된 방법에 따라 제조하였다. 본원에 기재된 바와 같이 일부 예에서, H3DGF-TMO, H3DGF-Si 및 H3DGF 전극을 결합하여 높은 에너지 및 높은 출력 밀도, 및 긴 사이클링 수명을 갖는 슈퍼커패시터 장치를 형성하였다.

[0261] 완전히 실장된 3DGF 및 H3DGF-SC 코인 전지는 약 35 Wh/kg 및 약 49 Wh/L (둘 다의 전극, 집전체, 전해질, 분리기 및 패키징을 포함하는 장치의 총 중량 또는 부피에 의해 정규화됨)의 적층 중량측정 및 부피측정 에너지 밀도를 나타낸다. 본원에 개시된 3DGF 또는 H3DGF 전극은 약 10 mg/cm^2 이상의 면적 질량 로딩을 포함하고, 이는 본원에 개시된 SC 장치에 사용될 때, 약 176 Wh/m^2 이상의 면적 출력 밀도에서 약 23 Wh/m^2 이상의 면적 에너지 밀도를 전달한다.

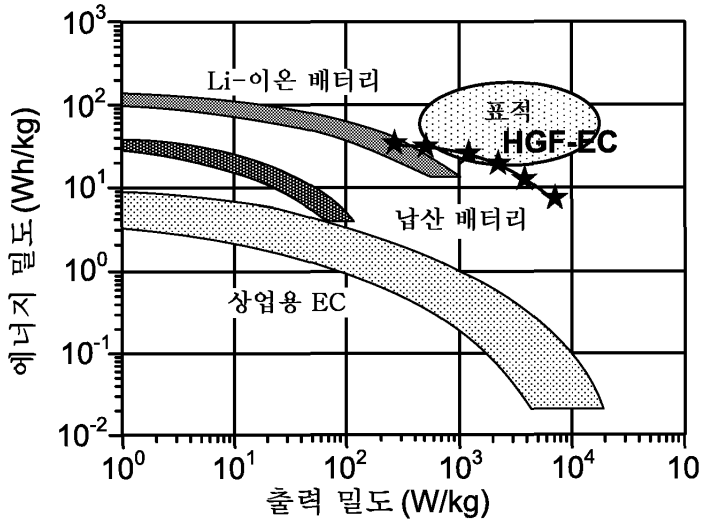
[0262] 예시적인 완전히 실장된 대칭적 SC를 3DGF 및 H3DGF로부터 제조하였고, 이는 상업용 SC의 것보다 약 10 배 이상인 최고 기록 에너지 밀도 (약 35 Wh/kg 및 약 50 Wh/L)를 전달하였다.

[0263] H3DGF-TMO 복합 애노드를 갖는 예시적인 하이브리드 H3DGF-TMO/H3DGF SC는 장치의 총 중량을 기준으로 하여 약 16-45 Wh/kg 이상 (전극 물질의 중량을 기준으로 하여 약 40-140 Wh/kg)의 전체 에너지 밀도를 달성하고, 전형적 SC의 출력 밀도 (약 1-10 kW/kg)를 유지하였다.

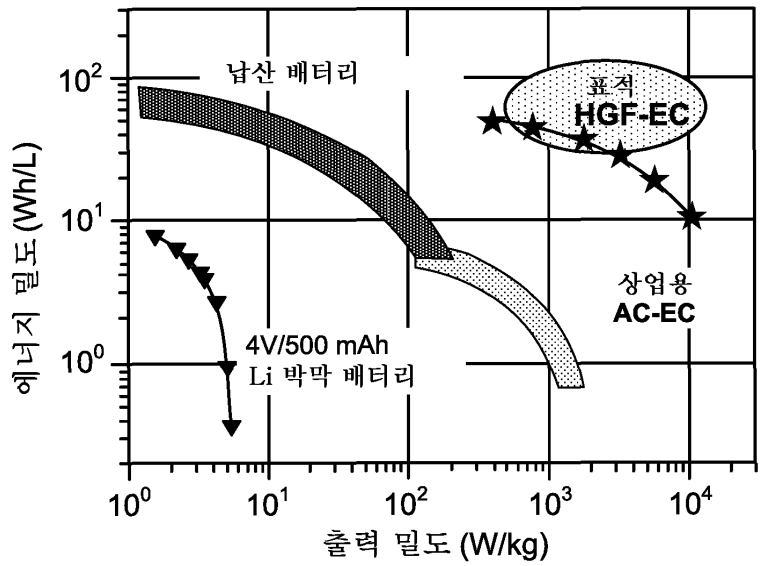
[0264] 높은 비용량 (약 500-2,000 mAh/g) 및 낮은 작동 전압 전위 (약 0.5 V 미만)을 갖는 예시적인 H3DGF-Si 복합 애노드는 H3DGF-Si/H3DGF 하이브리드 SC의 적층 에너지 밀도를 약 40-100 Wh/kg로 증가시킨다. 추가적으로, H3DGF-Si 복합 애노드 및 H3DGF-S 복합 캐소드를 사용하여 약 150-450 Wh/kg의 에너지 밀도를 갖는 H3DGF-Si/H3DGF-S EESD를 형성하였다.

도면

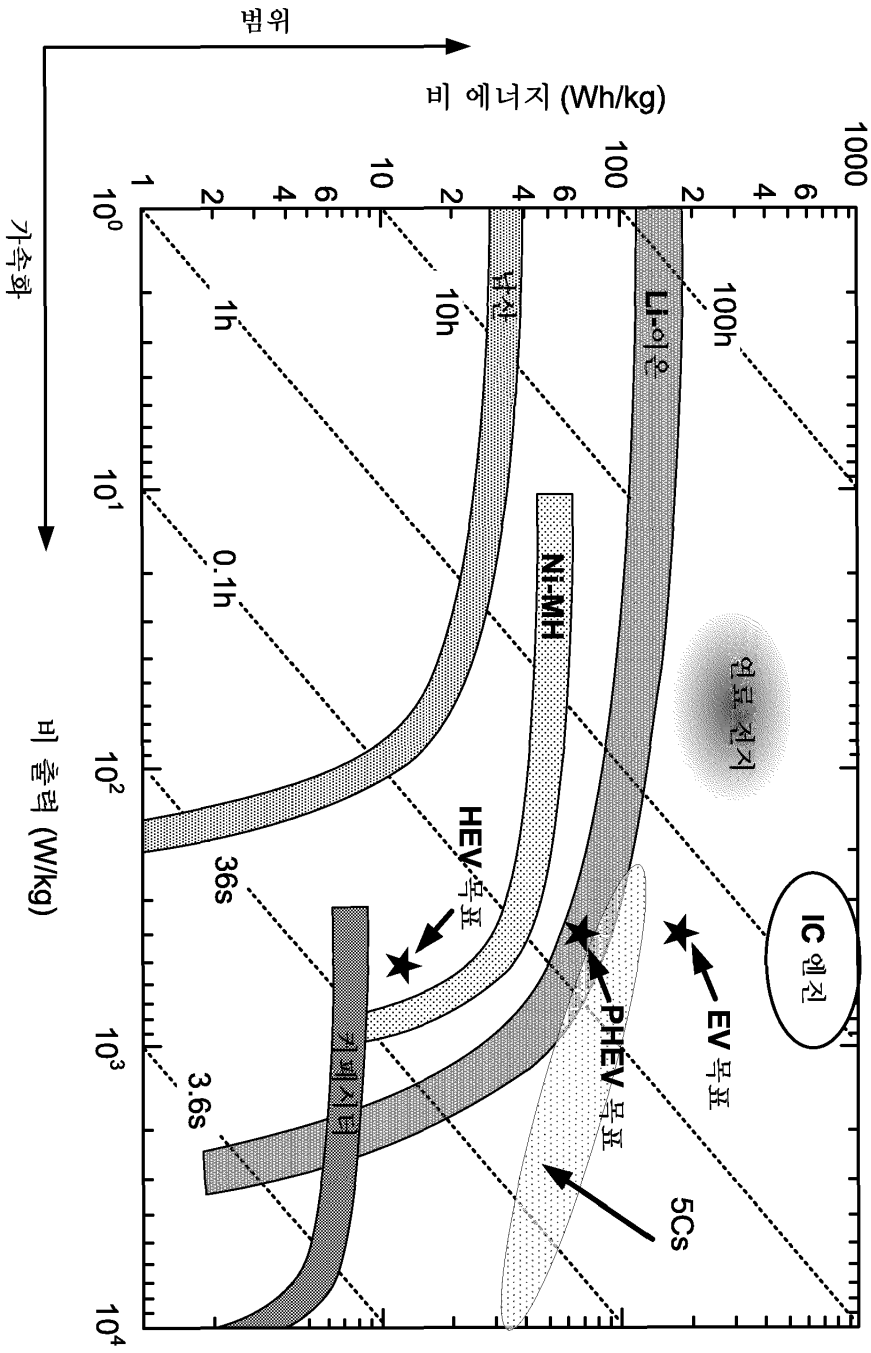
도면1a



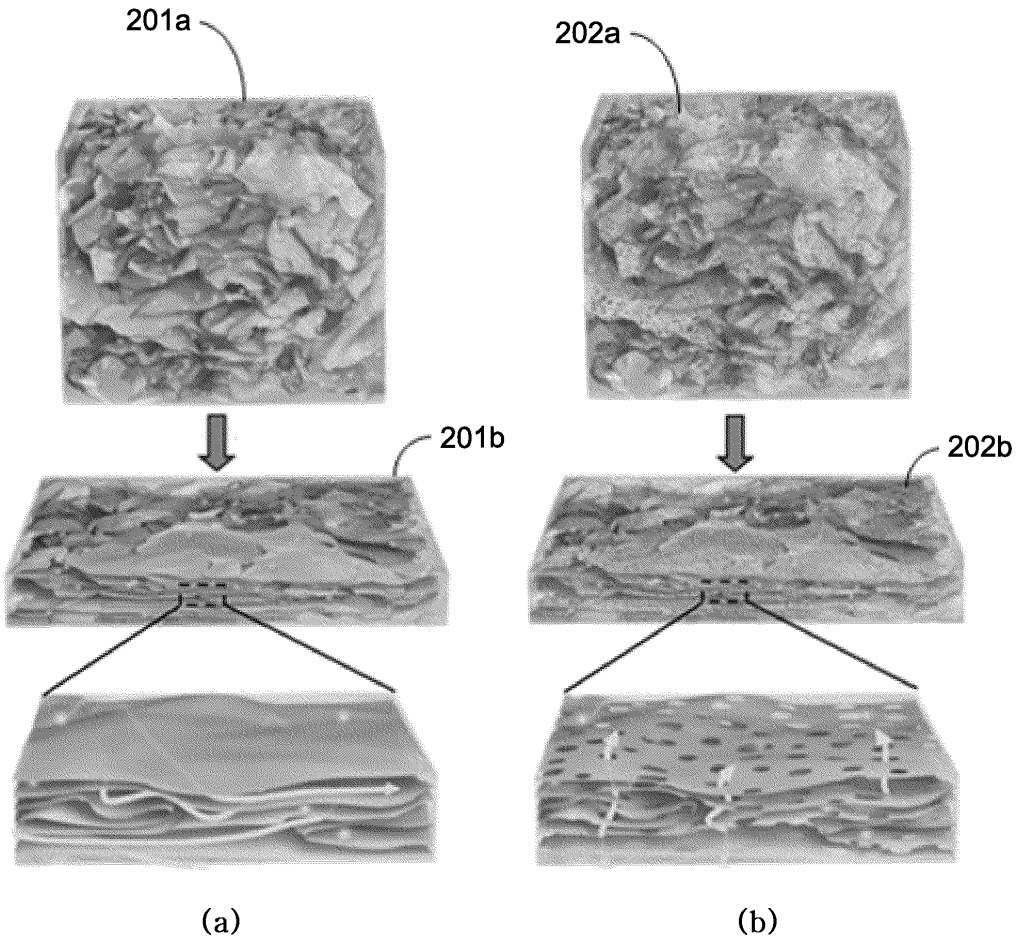
도면1b


납산 배터리
표적
HGF-EC
상업용
AC-EC
4V/500 mAh
Li 박막 배터리
에너지 밀도 (Wh/L)
출력 밀도 (W/kg)
10^0
10^1
10^2
10^3
10^4

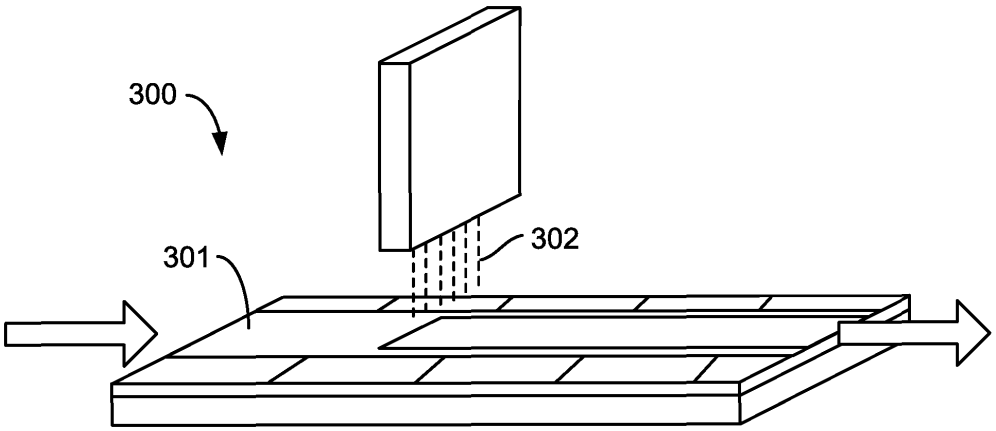
도면1c


범위
비 에너지 (Wh/kg)
가속화
비 출력 (W/kg)
1000
100
10
1
10^0
10^1
10^2
10^3
10^4
100h
10h
1h
0.1h
36s
3.6s
Li-이온
납산
Ni-MH
HEV 목표
PHEV 목표
EV 목표
IC 엔진
연료전지
5Cs
캐패시터

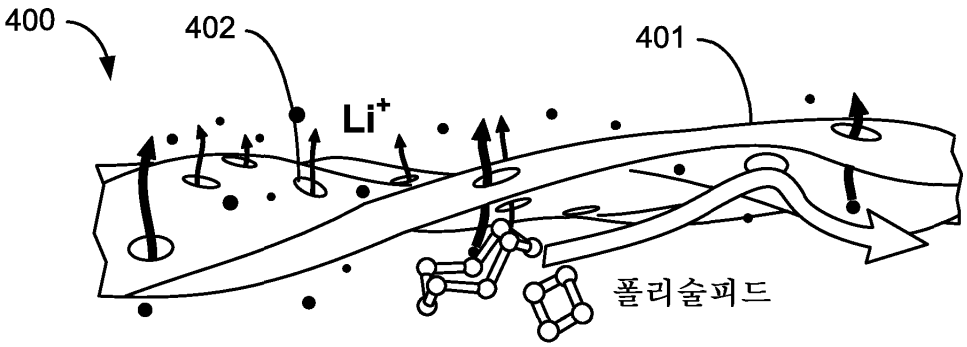
도면2



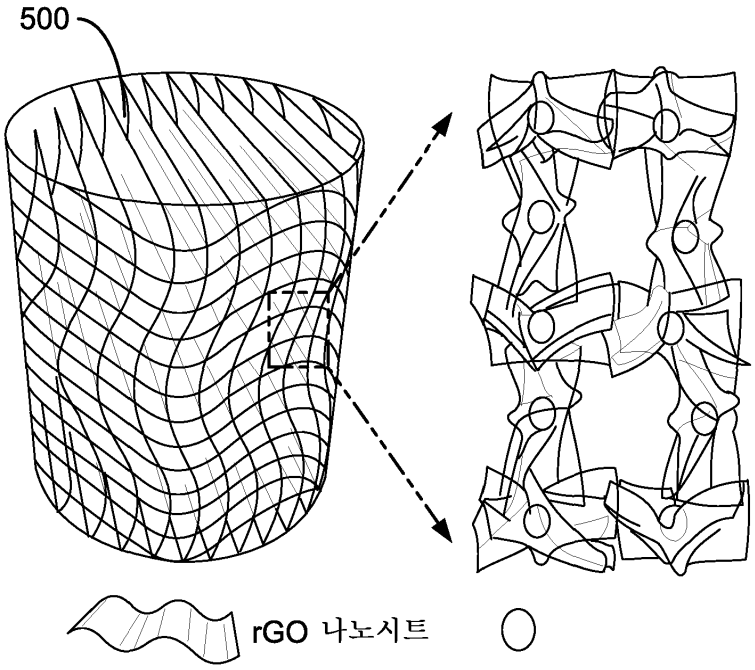
도면3



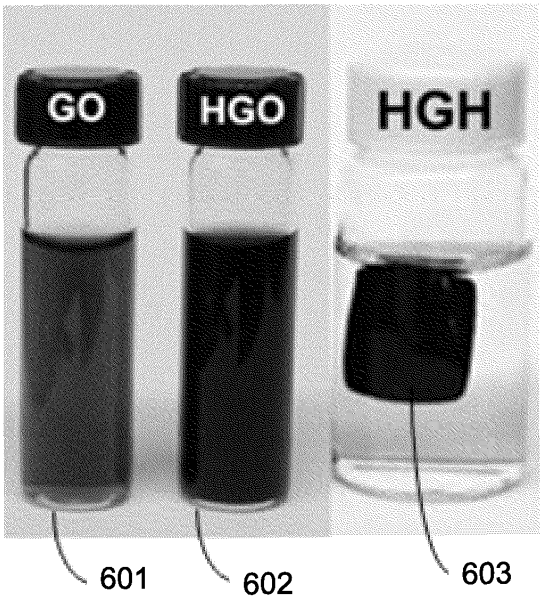
도면4



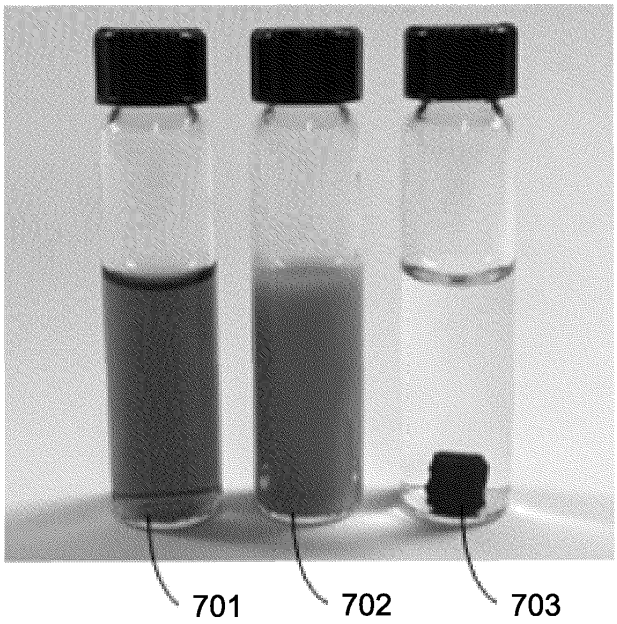
도면5



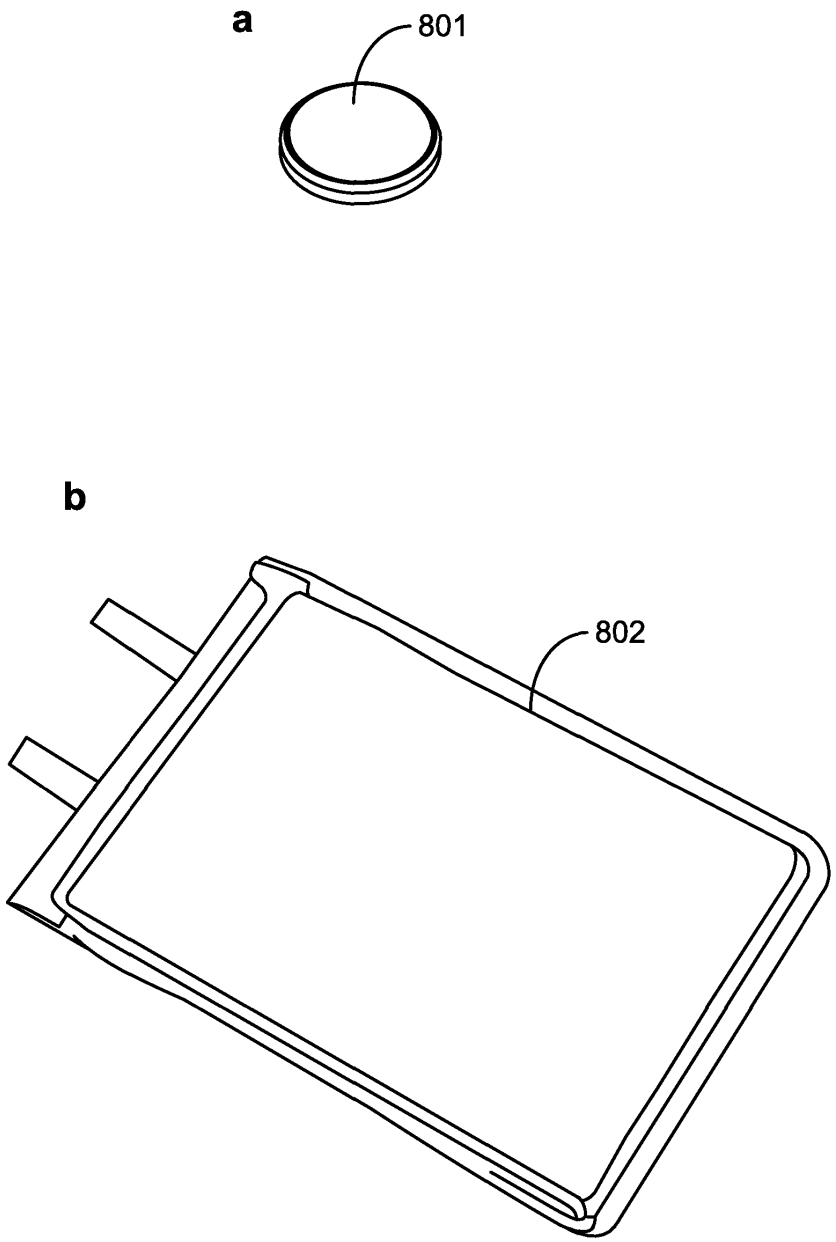
도면6



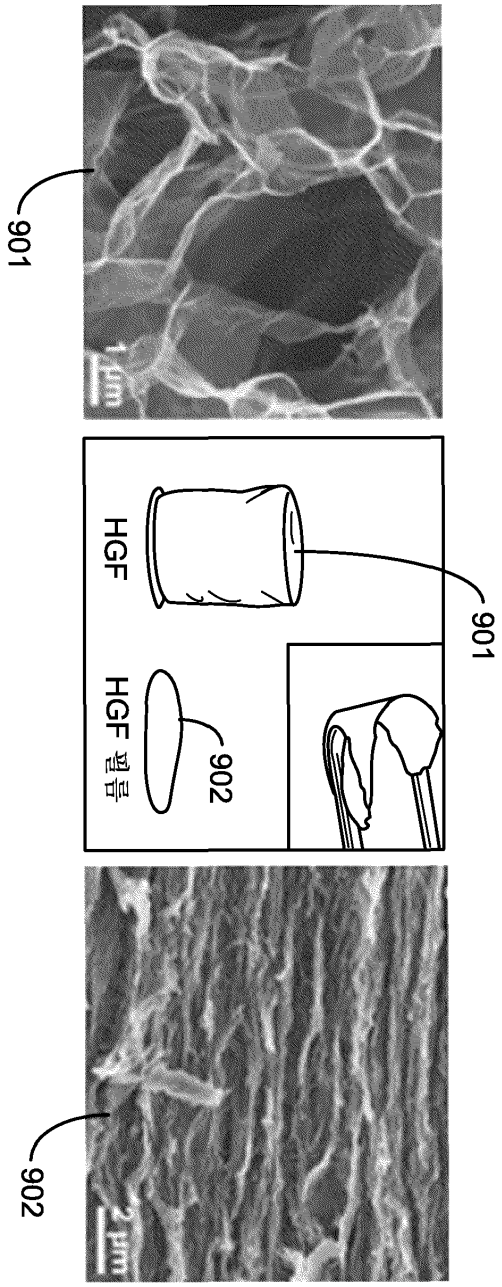
도면7



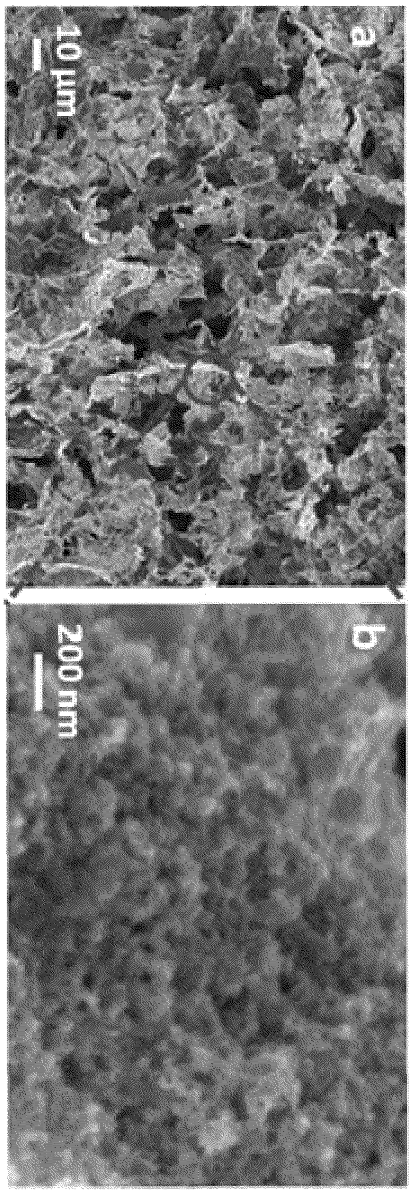
도면8



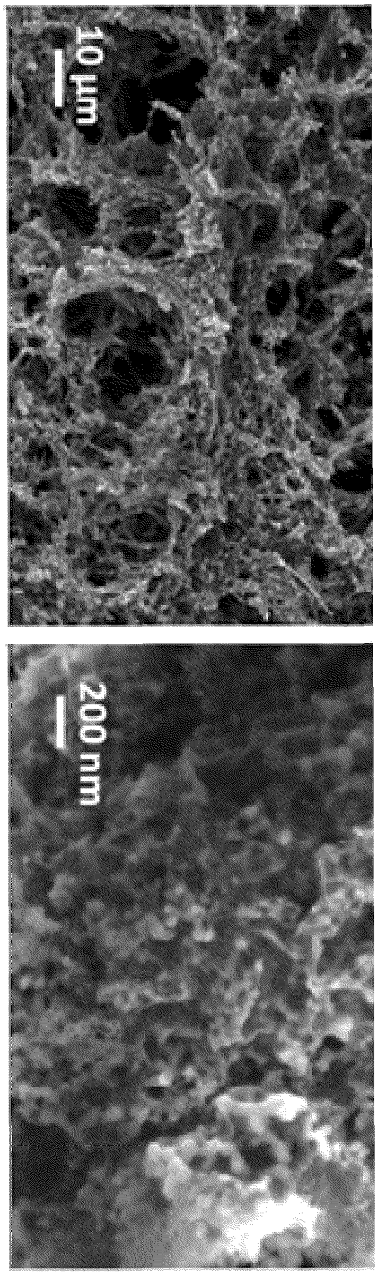
도면9



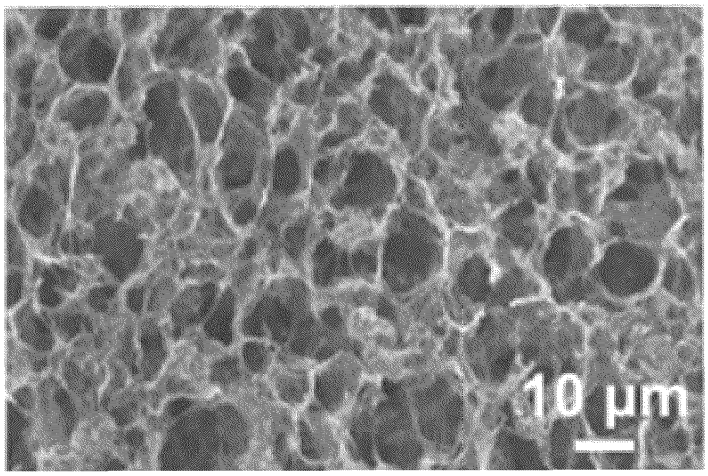
도면10



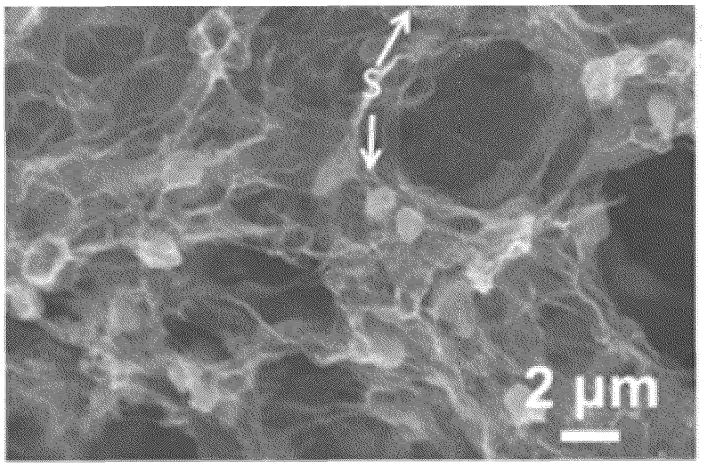
도면11



도면12

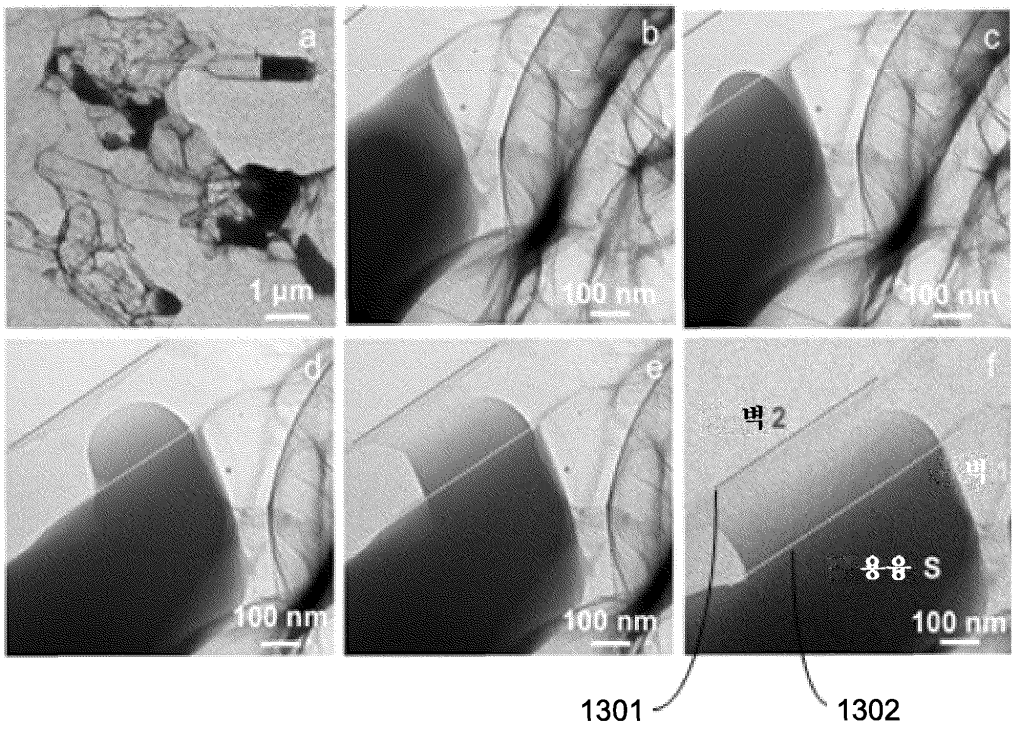


(a)

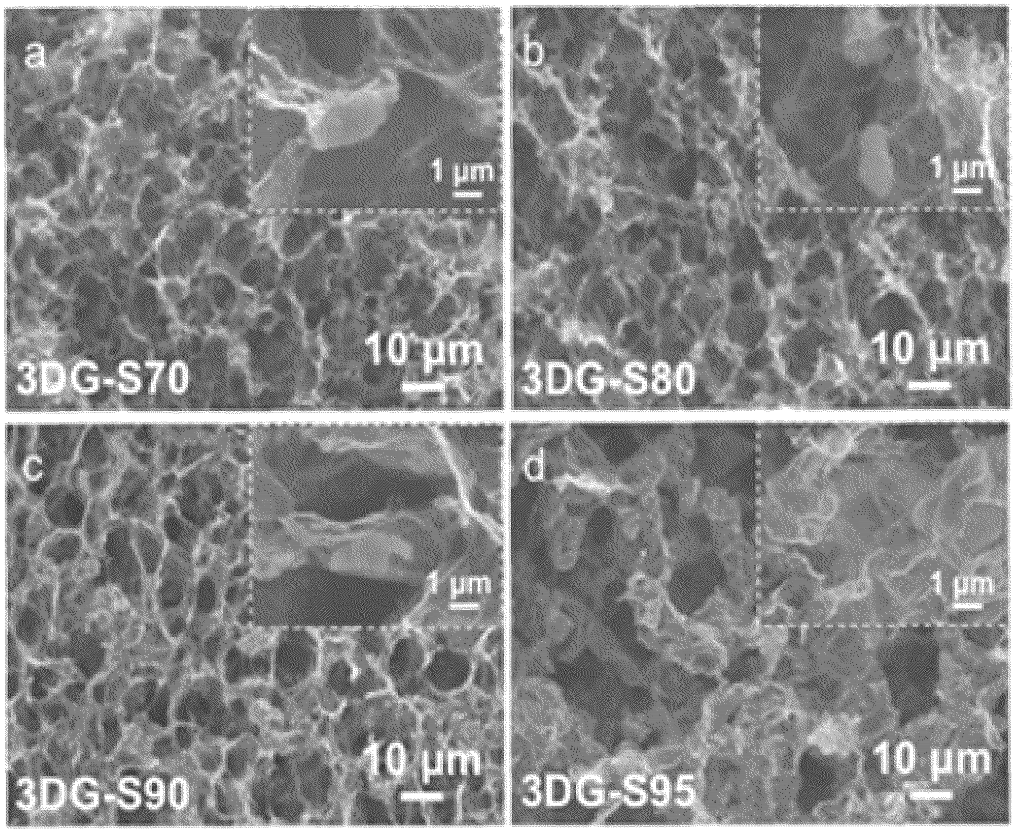


(b)

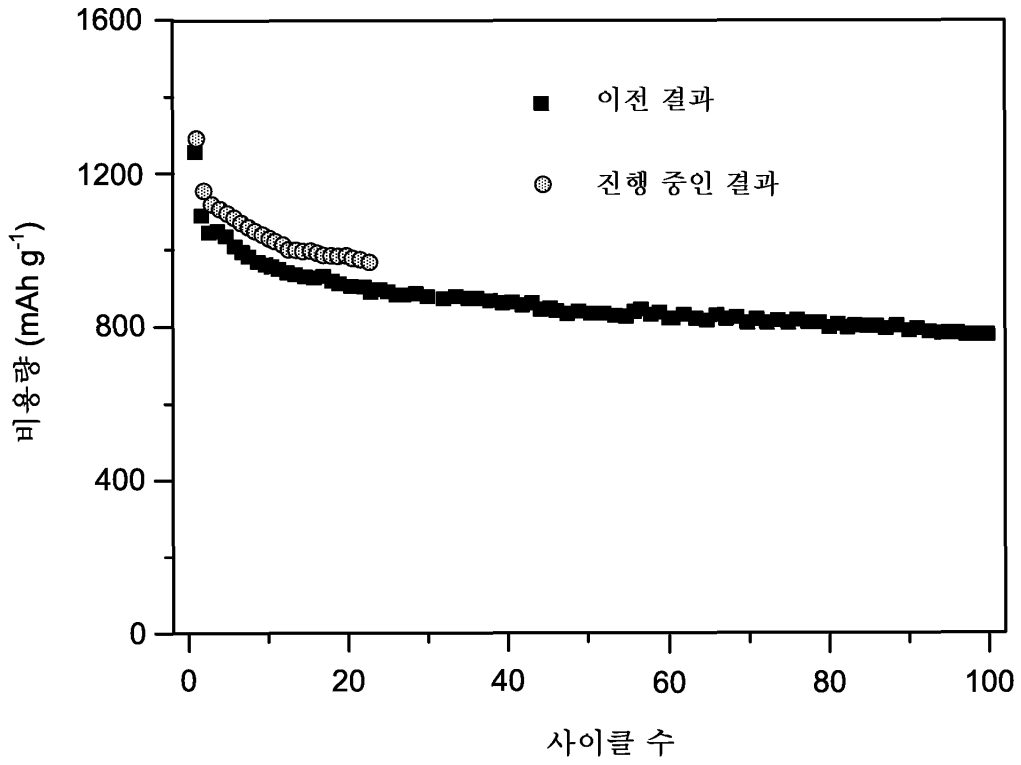
도면13


a
1 μm
b
100 nm
c
100 nm
d
100 nm
e
100 nm
f
벽 2
벽 1
S
100 nm
1301
1302

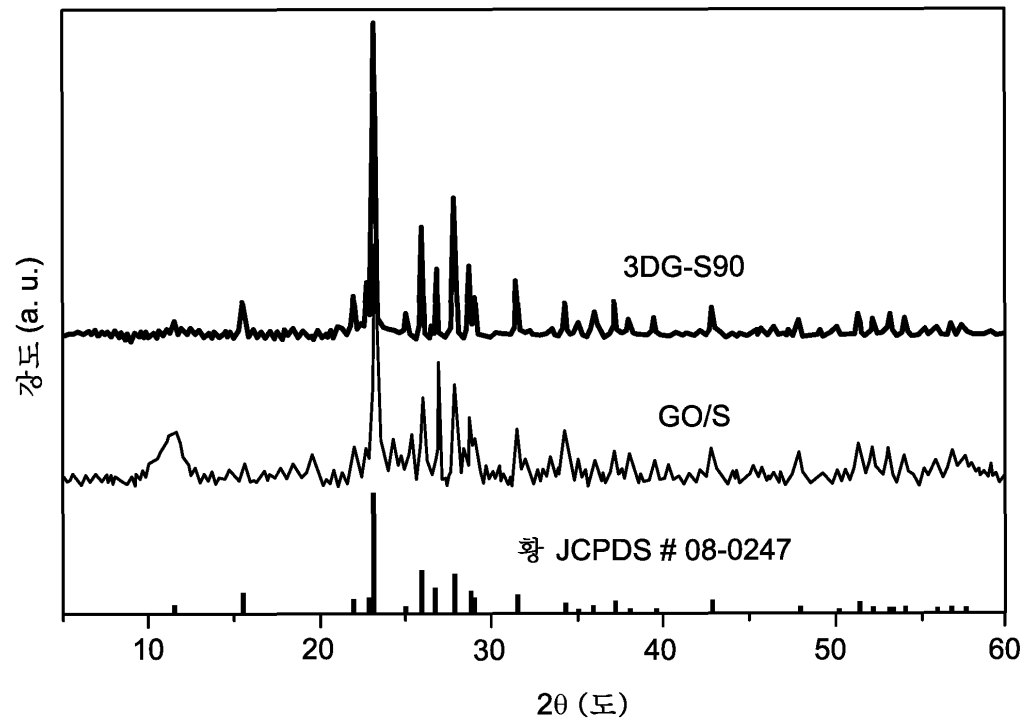
도면14


a
1 μm
10 μm
3DG-S70
b
1 μm
10 μm
3DG-S80
c
1 μm
10 μm
3DG-S90
d
1 μm
10 μm
3DG-S95

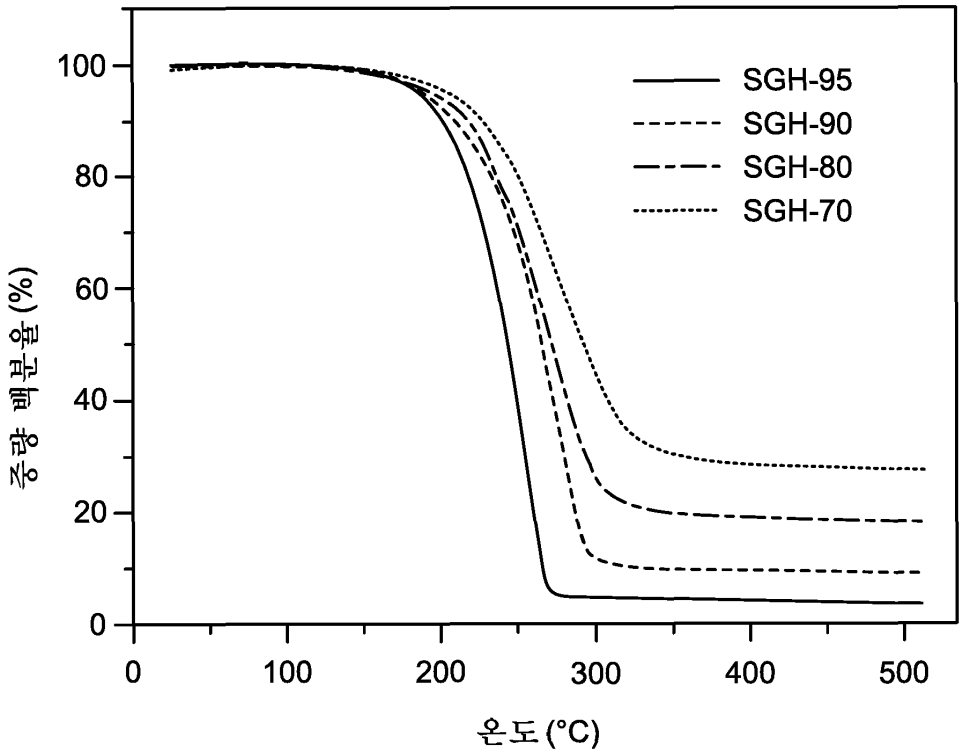
도면15


1600
1200
800
400
0
비용량 (mAh g-1)
0
20
40
60
80
100
사이클 수
이전 결과
진행 중인 결과

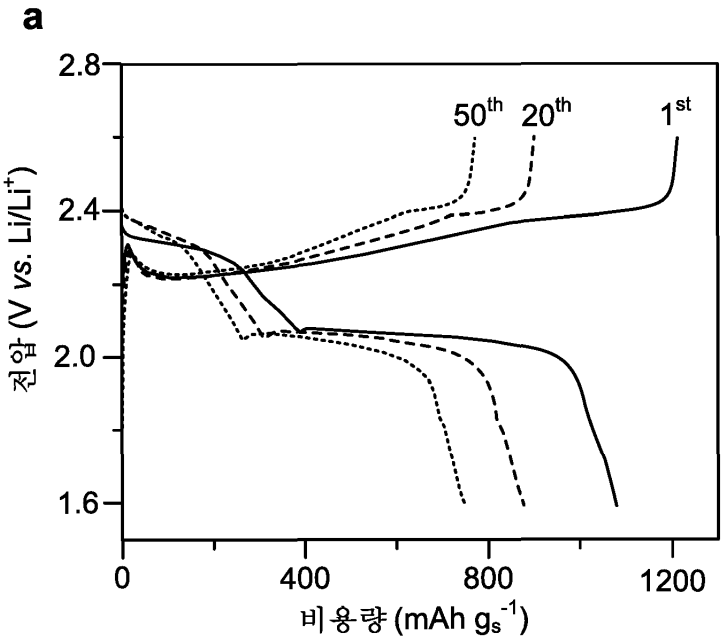
도면16


강도 (a. u.)
3DG-S90
GO/S
황 JCPDS # 08-0247
10
20
30
40
50
60
2θ (도)

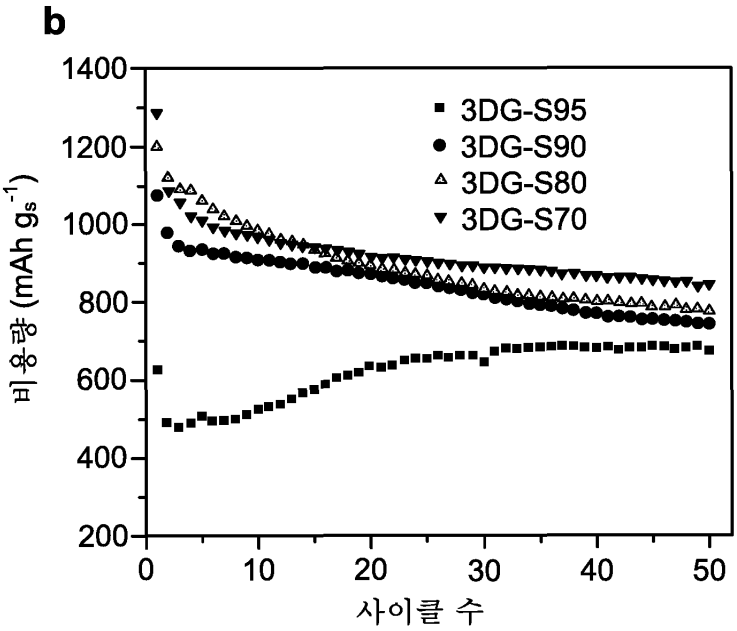
도면17


SGH-95
SGH-90
SGH-80
SGH-70
중량 백분율 (%)
온도 (°C)
0
20
40
60
80
100
0
100
200
300
400
500

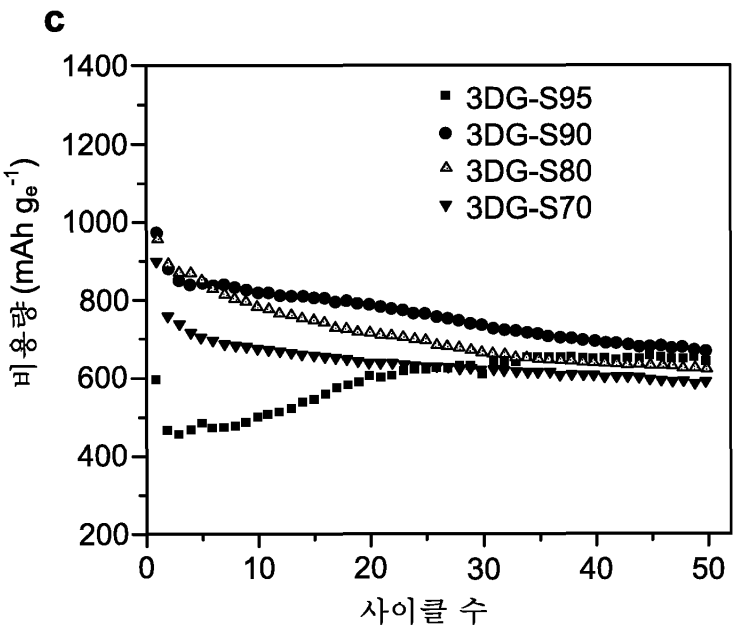
도면18a


a
50th
20th
1st
전압 (V vs. Li/Li+)
비용량 (mAh gs-1)
1.6
2.0
2.4
2.8
0
400
800
1200

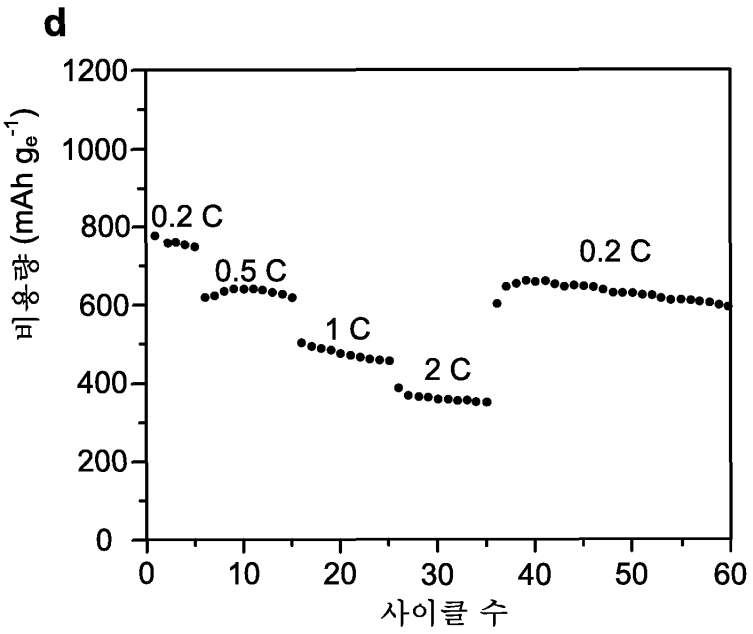
도면18b


b
1400
1200
1000
800
600
400
200
0
10
20
30
40
50
비용량 (mAh g_s^{-1})
사이클 수
3DG-S95
3DG-S90
3DG-S80
3DG-S70

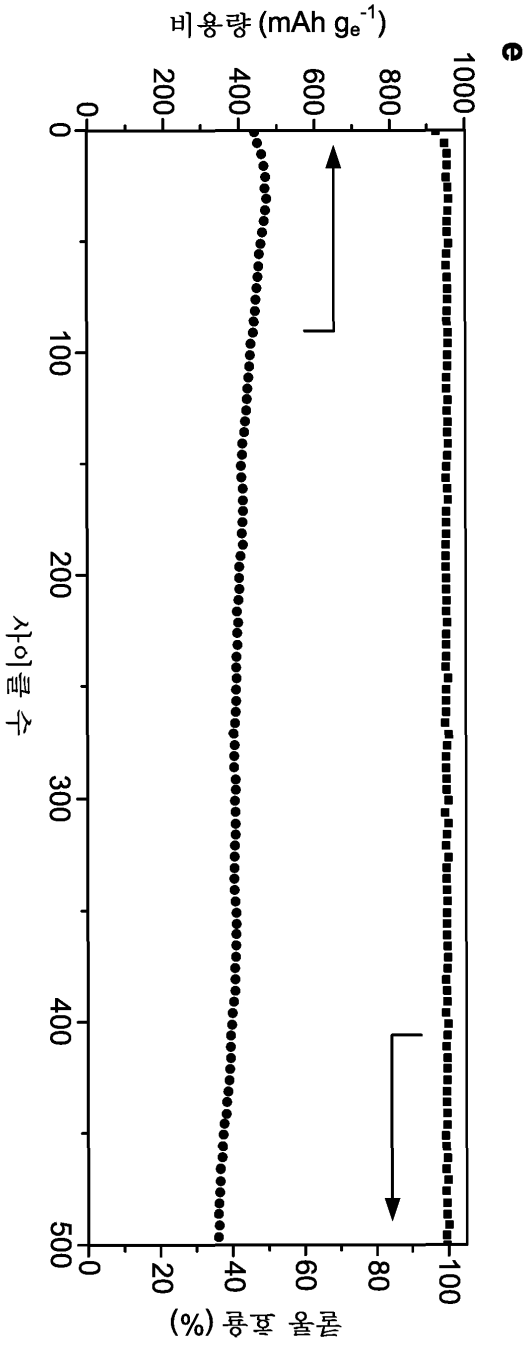
도면18c


c
1400
1200
1000
800
600
400
200
0
10
20
30
40
50
비용량 (mAh g_e^{-1})
사이클 수
3DG-S95
3DG-S90
3DG-S80
3DG-S70

도면18d


d
1200
1000
800
600
400
200
0
0
10
20
30
40
50
60
비용량 (mAh g_e^{-1})
사이클 수
0.2 C
0.5 C
1 C
2 C
0.2 C

도면18e


e
비용량 (mAh g_e^{-1})
0
200
400
600
800
1000
사이클 수
0
100
200
300
400
500
쿨롱 효율 (%)
0
20
40
60
80
100