



(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2019-0123995
(43) 공개일자 2019년11월04일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
H01G 11/86 (2013.01) H01G 11/46 (2013.01)
(52) CPC특허분류
H01G 11/86 (2013.01)
H01G 11/46 (2013.01)
(21) 출원번호 10-2018-0047998
(22) 출원일자 2018년04월25일
심사청구일자 2018년04월25일

(71) 출원인
인천대학교 산학협력단
인천광역시 연수구 아카데미로 119 (송도동)
(72) 발명자
진성훈
경기도 용인시 수지구 포은대로 219 서원마을현대
아이파크아파트3단지 301동 301호
(74) 대리인
차준용

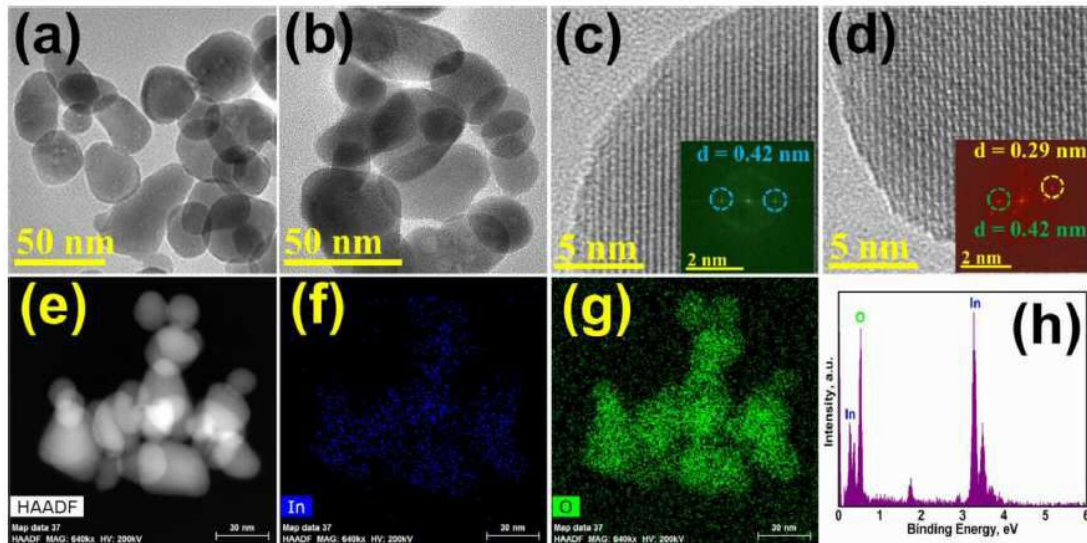
전체 청구항 수 : 총 10 항

(54) 발명의 명칭 2차원 인듐 산화물 나노디스크의 제조방법

(57) 요약

본 발명은 슈퍼커패시터(Supercapacitor)의 전극을 위해서 필요한 높은 전도성과 넓은 표면적을 지니는 신규 재료의 합성법에 관한 것으로, 계면활성제 등 공정 조건이 최적화된 열수화법(Hydrothermal method)을 통해 인듐 산화물(In_2O_3)을 표면적이 넓고 두께가 얇은 2차원 구조의 나노디스크 형상으로 조절함으로써, 그 재료적 특성을 크게 증대시키고, 슈퍼커패시터(특히, SSC)의 전극 소재로 적용시 비-정전용량, 전력 밀도, 에너지 밀도, 레이트 특성 및 사이클 안정성 등 소자의 성능을 크게 향상시킬 수 있는, 2차원 인듐 산화물 나노디스크의 제조방법에 관한 것이다.

대표도 - 도2



(52) CPC특허분류

Y02E 60/13 (2013.01)

이 발명을 지원한 국가연구개발사업

과제고유번호 201701010002

부처명 교육과학기술부

연구관리전문기관 한국연구재단

연구사업명 중견연구자지원사업

응용 연구과제명 저차원 전이금속 칼로젠-정렬 CNT 기반 나노구조 이중접합 및 웨이퍼스케일 스마트 센서

기 여 율 1/1

주관기관 인천대학교 산학협력단

연구기간 2018.03.01 ~ 2019.02.28

명세서

청구범위

청구항 1

계면활성제를 이용한 열수화법(Hydrothermal method)을 통해,
디스크 형상을 지닌 2차원 구조의 인듐 산화물(In_2O_3)을 합성하는 것을 특징으로 하는,
2차원 인듐 산화물 나노디스크의 제조방법.

청구항 2

제1항에 있어서,
상기 계면활성제는 헥사메틸디실라잔(HMDS)인 것을 특징으로 하는,
2차원 인듐 산화물 나노디스크의 제조방법.

청구항 3

제2항에 있어서,
상기 제조방법은 하나의 공정(One-step)으로 진행되는 것을 특징으로 하는,
2차원 인듐 산화물 나노디스크의 제조방법.

청구항 4

제3항에 있어서,
상기 인듐 산화물을 합성하기 위한 반응물은 InCl_3 및 NaOH 인 것을 특징으로 하는,
2차원 인듐 산화물 나노디스크의 제조방법.

청구항 5

a) 탈이온수에 InCl_3 를 첨가 및 교반하는 단계;
b) 얻어진 용액에 NaOH 용액을 혼합하여 슬러리를 형성하는 단계;
c) 계면활성제로서 헥사메틸디실라잔(HMDS)을 첨가하여 대상 물질의 크기 및 모양을 조절하는 단계;
d) 얻어진 용액을 오토클레이브에 옮기고 밀봉한 다음 가열하는 단계;
e) 실온까지 냉각시킨 후, 얻어진 결과물을 탈이온수 및 에탄올로 린스하는 단계; 및
f) 린스한 결과물을 건조 및 어닐링하는 단계;를 포함하는,
2차원 인듐 산화물 나노디스크의 제조방법.

청구항 6

제1항 내지 제5항 중 어느 한 항에 따른 방법으로 제조되어,
인듐 산화물(In_2O_3)이 디스크 형상의 얇은 2차원 구조를 지니게 되는 것을 특징으로 하는,
2차원 인듐 산화물 나노디스크(2D In_2O_3 nanodisc).

청구항 7

제6항에 있어서,
상기 2차원 인듐 산화물 나노디스크의 두께는 1 내지 100 nm인 것을 특징으로 하는,
2차원 인듐 산화물 나노디스크.

청구항 8

제6항에 따른 2차원 인듐 산화물 나노디스크 활물질, 도전제 및 바인더를 포함하는,
슈퍼커패시터 전극.

청구항 9

제8항에 따른 전극을 포함하는,
슈퍼커패시터.

청구항 10

제9항에 있어서,
상기 슈퍼커패시터는 고체-상태 대칭형 슈퍼커패시터(Solid-state symmetric supercapacitor; SSC)인 것을 특징으로 하는,
슈퍼커패시터.

발명의 설명

기술 분야

[0001] 본 발명은 슈퍼커패시터(Supercapacitor)의 전극을 위해서 필요한 높은 전도성과 넓은 표면적을 지니는 신규 재료의 합성법에 관한 것으로, 계면활성제 등 공정 조건이 최적화된 열수화법(Hydrothermal method)을 통해 인듐 산화물(In_2O_3)을 표면적이 넓고 두께가 얇은 2차원 구조의 나노디스크 형상으로 조절함으로써, 그 재료적 특성을 크게 증대시키고, 슈퍼커패시터(특히, SSC)의 전극 소재로 적용시 비-정전용량, 전력 밀도, 에너지 밀도, 레이트 특성 및 사이클 안정성 등 소자의 성능을 크게 향상시킬 수 있는, 2차원 인듐 산화물 나노디스크의 제조방법에 관한 것이다.

배경 기술

[0003] 최근 몇 년 동안, 친환경 분야에서 녹색 에너지원에 대한 수요 증대를 충족시키기 위해, 높은 전력 밀도, 빠른 충전-방전 속도 및 긴 사이클 수명을 지닌 슈퍼커패시터(Supercapacitor)가 특별한 주목을 받고 있다. 이에, 슈퍼커패시터는 메모리 백업 시스템, 휴대용 전자 장치, 군용 장치 및 하이브리드 차량에서 매력적인 전력 공급원 중 하나로 이용되고 있다. 또한, 신형의 플렉서블 및 투명 전자기기, 특히 보안 분야에 있어 광학적 투명성, 기

계적 굽힘성 및 우수한 전기적 특성을 지닌 전자 재료가 절실하게 요구되고 있다.

[0004] 이와 관련하여, 투명한 금속 산화물 반도체 중에서, 인듐 산화물(In_2O_3)은 가장 유망한 후보 중 하나로 여겨지고 있는바, 인듐 산화물(In_2O_3)은 넓은 광학적 밴드 갭(~ 3.7 eV), 우수한 반도체 특성, 우수한 발광 특성, 높은 이온 전도도 및 환경친화적 특성을 지녀, 광전자 공학 및 에너지 장치용으로 매우 적합하기 때문이다.

[0005] 이와 함께, 신형 전자기기의 핵심 구성요소인 고체-상태 대칭형 슈퍼커패시터(Solid-state symmetric supercapacitor; SSC)의 소자 성능을 증진시키기 위해, 전기 이중층 정전용량을 높이고 패러데이 산화환원 반응에 참여하는 다량의 표면 전기활성 중을 수용할 수 있도록 전극 물질의 표면적은 가능한 한 넓어야 한다.

선행기술문헌

비특허문헌

[0007] (비특허문헌 0001) B.T.-Yu Wei, C.-Hung Chen, H.-Chi Chien, S.-Yuan Lu, C.-Chang Hu, Adv. Mater. 22 (2010) 347-351.

발명의 내용

해결하려는 과제

[0008] 본 발명은 상기와 같은 종래의 요구를 충족시키기 위한 것으로, 큐빅 형태의 결정 구조를 가지기 때문에 넓은 표면적을 얻기 어렵고 이온 수송이 원활하지 못하며 패킹성이 낮은 기존 인듐 산화물(In_2O_3)의 단점을 극복하여, 높은 투명성과 더불어 전도성 및 표면적이 극대화된 우수한 재료적 특성을 지닌 2차원 인듐 산화물 나노디스크를 열수화법에 의해 합성하고, 이를 슈퍼커패시터 전극에 적용한 최초의 예를 제공함을 기술적 과제로 한다.

[0009] 구체적으로, 본 발명자는 예의 연구를 거듭하여, 기하학적 형상 변경에 의한 이온 확산 제어를 통해 SSC의 레이트 성능을 향상시킬 수 있는 새로운 2D In_2O_3 나노디스크 물질을 합성하는데 성공하였다. 이러한 물질을 이용해 제작된 소자는 독특한 나노디스크-모양 모폴로지에 의해 우수한 전기화학적 특성을 나타내었다. 특히, 2D In_2O_3 나노디스크의 제조는 비용이 낮고, 환경친화적이며, 실제 SSC 소자용으로서 우수한 생산 효율을 나타내었다. 또한, 2D In_2O_3 SSC에서 비-수계 전해질에 의해 구현되는 넓은 작동 전위 창을 지닌 우수한 레이트 성능은 높은 에너지 밀도를 요구하는 상업용 슈퍼커패시터에 필수불가결한 SSC의 핵심 장점이 될 수 있었다.

과제의 해결 수단

[0011] 상기한 기술적 과제를 달성하고자, 본 발명은 광학적으로 투명하여 슈퍼커패시터의 전극용으로 적합하지만 넓은 표면적을 얻기 어렵고 이온 수송이 원활하지 못하다는 단점을 지닌 In_2O_3 의 문제점을 해결하기 위해, 열수화법(Hydrothermal method)의 공정 변수를 최적화하여 2차원 구조의 In_2O_3 나노디스크를 형성함과 더불어 그 두께를 원활하게 조절할 수 있는 새로운 방법을 제공한다.

[0012] 구체적으로, 본 발명은 원-스텝 열수화법에 의해 합성된 고체-상태 대칭형 슈퍼커패시터(SSC)용 2차원 In_2O_3 나노디스크를 제공하며, 이에 기반한 개별 전극은 622 F/g(전류 밀도 3 A/g) 및 412 F/g(전류 밀도 7 A/g)의 높은 비-정전용량을 나타내었다. 또한, 본 발명에 따라 제작된 SSC는 1.0 V까지의 넓은 전위 창, 89.7 F/g(전류 밀도 1 A/g)의 우수한 비-정전용량, 12.5 Wh/kg(전력 밀도 500 W/kg)의 높은 에너지 밀도 및 $\sim 97\%$ 레이트 유지율(10000 사이클 후)의 뛰어난 안정성을 나타내었다.

[0013] 요컨대, 2D In_2O_3 나노디스크 물질을 이용한 SSC는 그 성능이 매우 우수하여 미래 전자기기 분야에의 적용에 매우 적합함을 확인하였다.

발명의 효과

- [0015] 본 발명에 따르면 In_2O_3 를 2차원 구조의 얇은 나노디스크 형상으로 제조할 수 있어 높은 투명성과 더불어 그 표면적 및 전도성을 극대화할 수 있다.
- [0016] 또한, 이러한 2D In_2O_3 나노디스크를 열수화법(Hydrothermal method)을 통해 하나의 공정(One-step)으로 쉽게 합성할 수 있고, 그 두께를 원활하게 조절할 수 있다.
- [0017] 이를 통해, 본 발명은 비-정전용량, 전력 밀도, 에너지 밀도, 레이트 특성 및 사이클 안정성 등 슈퍼커패시터의 전극에 요구되는 특성들이 대폭 향상된 신규한 형상의 재료를 제공할 수 있으며, 그 결과 슈퍼커패시터 소자의 성능을 크게 개선할 수 있다.

도면의 간단한 설명

- [0019] 도 1은 2D In_2O_3 나노디스크의 (a) XRD 패턴; (b) 라만 스펙트럼; (c) In 3d 피크와 관련된 XPS 좁은 스캔; (d) O 1s 피크와 관련된 XPS 좁은 스캔;이다.
- 도 2는 2D In_2O_3 나노디스크의 (a, b) 다양한 배율에서의 TEM 이미지; (c, d) HRTEM 이미지 및 상응하는 FFT; (e) HAADF 이미지; (f) In의 EELS 이미지; (g) O의 EELS 이미지; (h) EDX 스펙트럼;이다.
- 도 3은 (a) 다양한 전압 창에서 측정된 CV 곡선(스캔 속도 30 mV/s); (b) 다양한 전압 창에서 측정된 GCD 플롯(전류 밀도 3 A/g); (c) 다양한 스캔 속도(10-50 mV/s)에서 관찰된 CV 곡선; (d) 다양한 전류 밀도에서 측정된 GCD 플롯; (e) 비-정전용량 vs. 전류 밀도 플롯; (f) 에너지 밀도 vs. 전력 밀도 플롯; (g) 10000 GCD 사이클 전/후 전기화학 임피던스 스펙트럼(Nyquist 플롯); (h) 전류 밀도 3 A/g에서 10000 사이클에 걸친 GCD 사이클 안정성을 보여주는 그래프; (i) 3개 SSC 소자의 직렬 연결에 의해 적색, 황색 및 녹색 발광 다이오드(LED)가 조명됨을 보여주는 광학 사진 이미지;이다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

- [0020] 이하, 실시예 및 실험예를 통해 본 발명을 보다 구체적으로 설명한다. 그러나 이들 예는 본 발명의 이해를 돕기 위한 것일 뿐 어떠한 의미로든 본 발명의 범위가 이들 예로 한정되는 것은 아니다.

[0022] 실시예

[0023] (1) 2D In_2O_3 나노디스크의 합성

- [0024] 전형적인 절차로서, 자기 교반 하에서 10 mmol의 InCl_3 를 80 mL 탈이온수에 첨가하여 맑고 투명한 용액을 얻었다.
- [0025] 교반 하에서 2 mL의 2 M NaOH 용액을 혼합하여 슬러리를 형성한 후, 대상 물질의 크기 및 형상을 제어하기 위해 계면활성제로서 2 mL의 헥사메틸디실라잔을 첨가하였다.
- [0026] 얻어진 용액을 100 mL 부피의 Teflon-라이닝 스테인리스강 오토클레이브 내로 옮긴 후, 오토클레이브를 꼭 밀봉한 다음, 컨벡션 오븐에서 140℃로 24시간 동안 유지하였다.
- [0027] 실온까지 자연냉각시킨 후, 합성된 물질을 수집하고, 탈이온수 및 에탄올로 수회 린스하였다.
- [0028] 이어서, 공기 중에서 컨벡션 오븐을 이용해 60℃로 12시간 동안 건조시킨 직후, 공기 중에서 튜브 퍼니스를 이용해 400℃로 2시간 동안 어닐링하여, 순수한 2D In_2O_3 나노디스크를 수득하였다.

[0030] (2) 실험 조건

- [0031] 분말 X-선 회절(XRD) 패턴은 Rigaku SmartLab 회절계(* Cu K_α 방사: $\lambda = 1.54 \text{ \AA}$)를 이용해 확보하였다.

- [0032] 라만 분광법은 WITEC/alpha300 라만 시스템(* 여기 소스: He-Ne 레이저의 633 nm 라인)을 이용해 수행하였다.
- [0033] 물질의 화학 상태는 X-선 광전자 분광법(PHI 5000 VersaProbe II XPS)에 의해 분석하였다.
- [0034] 합성된 물질의 모폴로지 및 구조는 전계 주사 전자현미경(FESEM) 및 투과 전자현미경(TEM)에 의해 특성화하였다. FESEM 이미지는 JEOL/JSM-7800F 기기를 이용해 기록하였다. TEM 이미지, 고-해상도 TEM(HRTEM) 이미지, 전자 에너지 손실 분광법(EELS)에 의한 컬러 매핑을 수반한 원자-분해능 고각 환상 암시야(HAADF), 및 에너지 분산형 X-선 분광법(EDX)에 의한 포인트 분석은 FEI/Talos F200X 기기를 이용해 기록하였다.

[0036] (3) SSC 소자 제작 및 특성화

- [0037] 2D In_2O_3 나노디스크를 이용한 개별 전극(3-전극 셀 기하구조)의 형태로 전기화학적 연구를 수행하였다. 이때, Pt 와이어를 상대 전극, Ag/AgCl을 기준 전극, 1 M Na_2SO_4 를 전해질로 이용한 3-전극 시스템을 사용하였다. 작동 전극은 활물질(즉, 2D In_2O_3 나노디스크), 카본 블랙(도전재) 및 폴리비닐리덴 플루오라이드(PVDF)(바인더)를 80:10:10의 질량 비율로 N-메틸피롤리돈(NMP) 내에서 혼합하여 페이스트를 형성함으로써 제조하였다. 이어서, 페이스트를 유효 면적 1 cm^2 의 Ni 폼 위에 코팅하고, 진공 하에서 건조시켰다.
- [0038] 유효 작동 면적 1 cm^2 의 2개의 유사한 전극, 분리막으로서 Whatman 여과지 등급 2, 및 고체-상태 전해질로서 $\text{Na}_2\text{SO}_4/\text{PVA}$ 겔을 이용해 2-전극 시스템을 지닌 고체-상태 대칭형 슈퍼커패시터 소자(SSC)를 제작 및 연구하였다. $\text{Na}_2\text{SO}_4/\text{PVA}$ 겔 전해질은 1 g Na_2SO_4 및 1 g PVA($M_w = 31000 - 50000$)를 10 mL 탈이온수에 용해시킨 후, 격렬한 교반 하에서 90°C 로 2시간 동안 가열하여 제조하였다. 전극 및 분리막을 $\text{Na}_2\text{SO}_4/\text{PVA}$ 겔 전해질에 10분 동안 넣은 후, 공기 중에서 실온으로 3시간 동안 고화시켰다.
- [0039] 3-전극 시스템 및 2-전극 시스템(SSC)의 작동 전류 밀도는 로딩된 활물질(즉, 2D In_2O_3 나노디스크)의 질량에 의해 계산하였다.
- [0040] 사이클릭 볼타메트리(CV) 및 정전류 충전-방전(GCD)의 전기화학적 특성 분석은 전기화학 워크스테이션(CompactStat.h IVIUM Technologies)을 이용해 수행하였다. 전기화학 임피던스 분광법(EIS)은 동일한 전기화학 워크스테이션을 이용해 수행하였다.

[0042] 실험예

[0043] (1) XRD, 라만 및 XPS 분석 결과

- [0044] 도 1(a)는 2D In_2O_3 나노디스크의 XRD 스펙트럼으로서, In_2O_3 의 큐빅 상(JCPDS 71-2194)을 보여주며, 각각 격자 간격 0.29 nm, 0.25 nm, 0.17 nm 및 0.29 nm에 상응하는 (2 2 2), (4 0 0), (4 4 0) 및 (6 2 2)와 같은 고-강도 피크 평면이 몇 개 나타났다.
- [0045] 도 1(b)는 2D In_2O_3 나노디스크의 라만 스펙트럼으로서, $E_{1g}(307.8 \text{ cm}^{-1})$, $E_{2g}(366.3 \text{ cm}^{-1})$, $A_{1g}(494.8 \text{ cm}^{-1})$ 및 $E_{2g}(630.2 \text{ cm}^{-1})$ 의 특징적인 격자 진동 포논 모드와 430 cm^{-1} 에 해당하는 추가적인 결함 상태를 지니고 있다.
- [0046] 도 1(c, d)는 2D In_2O_3 나노디스크의 좁은 스캔 XPS 스펙트럼으로서, In 3d 피크(즉, 특징적인 스핀-궤도 분리 In $3d_{5/2}(444.62 \text{ eV})$ 및 In $3d_{3/2}(452.23 \text{ eV})$)와 530.1 eV에서 O 1s 피크를 나타낸다(인듐-산소 클러스터).

[0048] (2) TEM, HRTEM(FFT), HAADF, EESL, EDX 및 포인트 분석 결과

- [0049] 도 2(a, b)는 다양한 직경을 지닌 In_2O_3 나노디스크-모양 구조를 나타낸다. 도 2(a, b)에서 타원 상의 디스크들이 겹쳐지는 부분이 있는바, 두께가 두꺼우면 빛이 투과하지 못하는데 투과하여 이미지가 형성되는 것에 의해 그 두께가 얇다는 사실을 알 수 있다. 2D In_2O_3 나노디스크 구조는 Na_2SO_4 전해질과 최대한으로 표면 상호작용할

수 있는 가능성을 보여준다.

- [0050] 도 2(c, d)는 2D In_2O_3 나노디스크의 고-해상도 TEM(HRTEM) 이미지 및 상응하는 고속 푸리에 변환(FFT) 이미지를 보여주는데, 면간격 $d_{(2\ 1\ 1)} = 0.42\text{ nm}$ 의 결정 구조, 및 격자 간격 $d = 0.29_{(2\ 2\ 2)}\text{ nm}$ 및 $0.42_{(2\ 1\ 1)}\text{ nm}$ 를 지닌 혼합 평면을 명확하게 확인할 수 있다. 또한, FESEM 이미지에 의해서도 In_2O_3 의 2D 나노디스크-모양 구조를 확인할 수 있었다.
- [0051] 도 2(e-h)는 EELS에 의한 컬러 매핑을 수반한 HAADF 및 EDX에 의한 포인트 분석을 이용해 2D In_2O_3 나노디스크를 포괄적으로 분석한 결과를 보여준다. 도 2(e-g)에서 보듯이, HAADF 및 EELS 매핑 결과 2D In_2O_3 나노디스크의 In 및 O가 균일하게 분포되어 있음을 알 수 있다. 또한, 도 2(h)의 EDX 결과는 In 및 O의 원소 조성, 및 In_2O_3 의 Куб릭 상을 검증시켜 주었다.
- [0053] (3) CV, GCD, Nyquist 플롯 및 실제 사용가능성 분석 결과
- [0054] SSC 연구로서, 도 3(a)는 다양한 전위 창에서 SSC 소자의 CV 곡선(스캔 속도 30 mV/s)을 보여준다. 도 3(a)는 오버랩된 직사각형 형상을 나타내었는데, 이는 거의 이상적인 커패시터 특징을 의미하는 것이다.
- [0055] 도 3(b)는 다양한 전위 창(0.4-1.0 V) 및 전류 밀도 3 A/g에서의 GCD 플롯이다. 도 3(b)는 제작된 SSC 소자가 1.0 V의 높은 작동 전위 창에서도 대칭형 삼각형 성질을 지닌 우수한 용량적 거동을 나타냄을 입증시켜 준다. 또한, 이러한 결과는 전위 창이 0.4 V $\rightarrow$ 1.0 V로 증가함에 따라 비-정전용량도 증가하며, 그로 인해 SSC의 성능이 급격하게 개선됨을 보여준다. 따라서, 본 연구는 작동 전위 창 1.0 V가 최적적이고, SSC에서 우수한 용량적 성능을 구현함을 확인시켜 준다.
- [0056] 도 3(c)는 다양한 스캔 속도 및 넓은 전위 창(0-1.0 V)에서 SSC의 CV 곡선을 보여준다. 이 경우 역시 전위 창이 증가함에 따라 직사각형 곡선 아래의 면적이 증가하는 것으로 명확히 확인되었는데, 이는 개선된 에너지 저장 성능을 의미한다.
- [0057] 또한, CV 절차는 전해질(Na^+ , SO_4^{2-})에서 상대적으로 느린 이온 확산에 의해 제어되었다. 다양한 전류 밀도 1 A/g 내지 5 A/g에서 SSC의 GCD 플롯을 도 3(d)에 나타내었다. 도 3(d)는 대칭 및 선형 형상을 보였는데, 이는 IR 강하가 나타나지 않음을 의미한다. 이러한 결과는 2D In_2O_3 나노디스크 구조가 우수한 슈퍼커패시터 거동을 나타나게 하고, 전극 물질 및 전해질 이온 간의 상호작용을 증진시키는데 결정적 역할을 함을 보여준다.
- [0058] 도 3(e)에서, SSC 소자는 89.7 F/g(전류 밀도 1 A/g 기준) 및 81 F/g(전류 밀도 5 A/g 기준)의 높은 비-정전용량과 정전용량 유지율 90.3%(전류 밀도 5 A/g 기준)의 높은 레이트 성능을 나타내었다.
- [0059] 또한, 도 3(f)에서 보듯이, SSC 소자는 12.5 Wh/kg(500 W/kg 기준)의 높은 에너지 밀도 및 2500 W/kg(11.3 Wh/kg 기준)의 초-고 전력 밀도를 나타내었다. 아울러, SSC의 성능과 관련하여 전술한 특성 및 모폴로지 효과가 고려될 수 있는데, (i) 개방된 면을 지닌 2D In_2O_3 나노디스크가 우수한 계면 접촉성을 지니 내부 저항을 감소시키는데 유리하다는 점, (ii) 충전/방전 절차를 통한 전자의 확산 길이가 단축되어 2D In_2O_3 나노디스크의 전기화학적 활용성을 증진시킬 수 있는 점이 그것이다.
- [0060] 도 3(g)는 10000 GCD 사이클 전/후 2D In_2O_3 나노디스크 기반 SSC의 Nyquist 플롯이다. SSC 소자는 매우 작은 용액 저항을 나타내었는데, 10000 사이클 전/후 $R_s = 1.53\ \Omega/2.07\ \Omega$ 및 전하 이동 저항 $R_{ct} = 0.86\ \Omega/0.90\ \Omega$ 이었다. 반원의 직경이 작은 것은 전하 이동 저항이 낮음을 의미하고, 저-주파수 영역에서의 직선은 전해질에서 2D In_2O_3 나노디스크 표면으로의 확산 저항에서 유래한 것이다. 이러한 결과는 In_2O_3 나노디스크의 넓은 개방 표면적 및 우수한 전도도에 기인한 것으로서, 2D In_2O_3 나노디스크 기반 SSC 소자의 우수한 안정성을 제시해 준다.
- [0061] 또한, 도 3(h)에서 보듯이, 10000 GCD 사이클(3 A/g 기준) 후에도 비-정전용량은 그 원래 값의 97%를 유지하였는데, 이는 SSC 소자가 내구성이 있어 장기간의 안정적 사용에 적합함을 입증시켜 주는 것이다.
- [0062] 나아가, 도 3(i)에서 보듯이, 2D In_2O_3 나노디스크 물질을 이용해 제작된 SSC 소자 3개를 직렬 연결하여 적색,

항색 및 녹색 발광 다이오드(LED)를 작동시켜 본 결과, LED를 성공적으로 점등시킬 수 있었다.

[0064] **결과 검토**

[0065] 본 발명에 따른 2D In_2O_3 나노디스크는 SSC용 전극 물질로서 높은 비-정전용량, 높은 전력 밀도, 우수한 레이트 성능 및 뛰어난 사이클 안정성을 구현하였다.

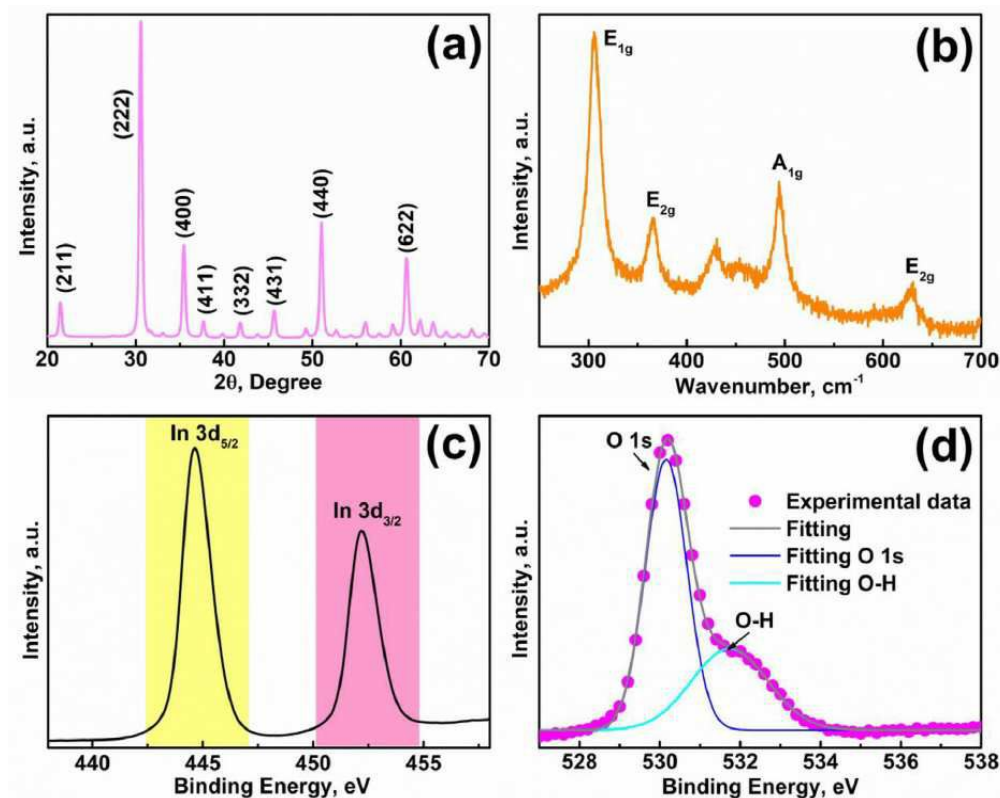
[0066] 요컨대, 본 발명에 따른 2D In_2O_3 나노디스크는 고-성능 SSC용 전극 물질로서 매우 적합하게 사용될 수 있음이 입증되었다.

산업상 이용가능성

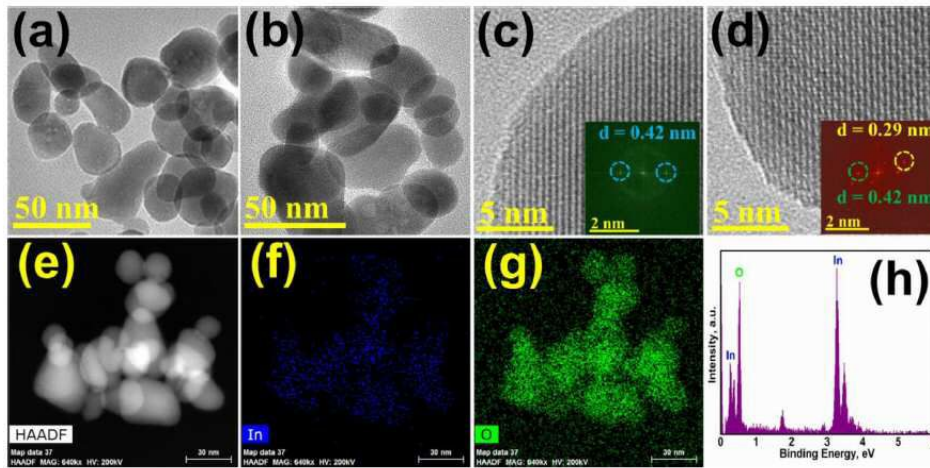
[0068] 본 발명에 따른 2D In_2O_3 나노디스크 기반의 고-성능 슈퍼커패시터는 풍차와 같이 풍력에너지를 전기에너지로 전환할 때 활용되는 응용처에서, 외부의 돌풍에 의한 시스템의 보호 용도로, 전기자동차 및 굴착기 등 순간적으로 큰 전력을 필요로 하는 시스템에서 특히 유용하게 적용될 수 있다.

도면

도면1



도면2



도면3

