



(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2019-0010409
(43) 공개일자 2019년01월30일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
H01L 51/00 (2006.01) H01L 21/288 (2006.01)
(52) CPC특허분류
H01L 51/0021 (2013.01)
H01L 21/288 (2013.01)
(21) 출원번호 10-2018-0035821
(22) 출원일자 2018년03월28일
심사청구일자 2018년03월28일
(30) 우선권주장
1020170092241 2017년07월20일 대한민국(KR)

(71) 출원인
고려대학교 산학협력단
서울특별시 성북구 안암로 145, 고려대학교 (안암동5가)
(72) 발명자
윤효재
서울특별시 성북구 동소문로15길 99, 118동 402호
김미소
서울특별시 은평구 은평터널로13길 9-8, 2층
(74) 대리인
정은열

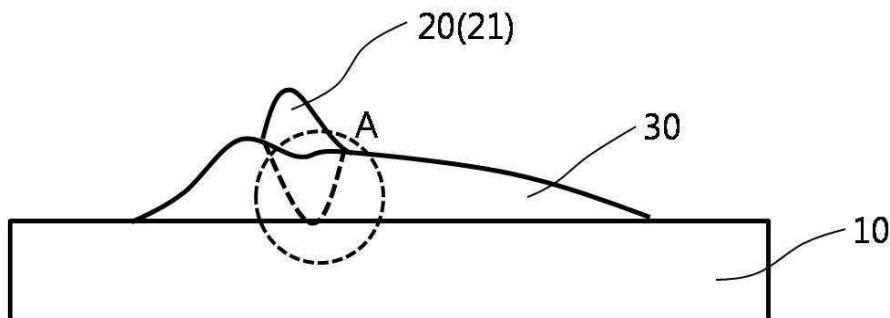
전체 청구항 수 : 총 11 항

(54) 발명의 명칭 액체금속 전극 및 이의 제조방법

(57) 요약

본 발명은 액체금속을 기반으로 하는 전극에 관한 것으로, 본 발명의 실시예에 따른 액체금속 전극은, 기재(10) 표면 상(on)에 형성되는 액체금속 전극으로서, 액체금속(21)을 포함하고, 소정의 형상으로 형성되며, 일단이 기재(10) 표면에 계면접촉되는 전도부(20); 및 폴리머를 포함하고, 전도부(20)의 일단 중 기재(10)와 비접촉된 비접촉 외면을 감싸면서, 기재(10) 표면에 결합되어, 전도부(20)를 기재(10) 표면에 접합시키는 접합부(30);를 포함한다.

대표도 - 도1



(52) CPC특허분류

H01L 2924/01031 (2013.01)

H01L 2924/01049 (2013.01)

이 발명을 지원한 국가연구개발사업

과제고유번호 NRF-2017M3A7B8064518

부처명 미래부

연구관리전문기관 한국연구재단

연구사업명 원천기술개발사업 나노·소재 기술개발사업 > 도전형소재기술개발프로그램

연구과제명 자기조립단분자층 고유의 양자특성에 기초한 양자 암호화 기술 개발

기 여 율 70/100

주관기관 고려대학교

연구기간 2017.10.02 ~ 2018.06.30

이 발명을 지원한 국가연구개발사업

과제고유번호 2016K1A3A1A32913180

부처명 미래부

연구관리전문기관 한국연구재단

연구사업명 과학기술국제화사업 > 국제화기반조성사업 > 해외협력기반조성-국가간협력기반조성사업 >

미공군 협력사업

연구과제명 터널링 정션을 이용한 유독 가스 및 폭발성 가스 감지 응용 분야 개척

기 여 율 30/100

주관기관 고려대학교

연구기간 2016.07.01 ~ 2017.06.30

명세서

청구범위

청구항 1

기재 표면 상(on)에 형성되는 액체금속 전극에 있어서,
상기 액체금속 전극은,
액체금속을 포함하고, 소정의 형상으로 형성되며, 일단이 상기 기재 표면에 계면접촉되는 전도부; 및
폴리머를 포함하고, 상기 전도부의 일단 중 상기 기재와 비접촉된 비접촉 외면을 감싸면서, 상기 기재 표면에 결합되어, 상기 전도부를 상기 기재 표면에 접합시키는 접합부;
를 포함하는 액체금속 전극.

청구항 2

청구항 1에 있어서,
상기 액체금속은,
갈륨-인듐 공융합금(eutectic gallium-indium alloy, EGaIn)으로 이루어진 액체금속 전극.

청구항 3

청구항 1에 있어서,
상기 전도부는,
상기 액체금속의 표면이 산화되어 생성되고, 상기 액체금속을 소정의 형상으로 유지하는 산화물층;
을 더 포함하는 액체금속 전극.

청구항 4

청구항 1에 있어서,
상기 접합부의 일단은,
원추형으로, 상기 기재 표면을 향하여 뾰족하게 형성된 액체금속 전극.

청구항 5

청구항 1에 있어서,
상기 폴리머는,
유동성 있는 상태로 상기 기재 표면에 배치되어 상기 전도부의 비접촉 외면을 감싼 이후에 경화되는 광경화성 폴리머 또는 열경화성 폴리머인 액체금속 전극.

청구항 6

청구항 1에 있어서,
상기 기재 표면은,
단분자층(molecular monolayer)으로 형성된 액체금속 전극.

청구항 7

청구항 1에 있어서,
상기 액체금속 전극은,
분자전자소자 디바이스(molecular scale electronic device)의 마이크로 전극으로 사용되는 액체금속 전극.

청구항 8

(a) 내부에 액체금속을 수용하는 시린지(syringe)를 이용해, 상기 액체금속이 소정의 형상으로 상기 시린지의 토출부에 뿜히도록, 상기 액체금속을 토출하여 성형하는 단계;
(b) 상기 시린지를 이동시켜, 성형된 상기 액체금속의 일단을, 기재 표면 상(on)에 계면접촉시키는 단계;
(c) 유동성 있는 폴리머를 상기 기재 표면 상(on)에 배치시키는 단계;
(d) 상기 액체금속과 상기 기재 사이의 계면접촉 영역이 덮히도록, 상기 폴리머를 이동시키는 단계;
(e) 상기 폴리머를 경화시키는 단계; 및
(f) 상기 시린지를 상승시켜, 계면접촉된 상기 액체금속으로부터 상기 시린지를 분리하는 단계;
를 포함하는 액체금속 전극 제조방법.

청구항 9

청구항 8에 있어서,
상기 (a) 단계는,
상기 액체금속을 토출하여, 상기 시린지의 토출부에, 방울 형상으로 상기 액체금속을 1차 성형하는 단계;
상기 시린지를 이동시켜, 1차 성형된 상기 액체금속의 일단을, 소정의 기판에 접촉시키는 단계; 및
1차 성형된 상기 액체금속의 일단이 분리되도록, 상기 시린지를 상승시켜, 상기 시린지에 뿜힌 상기 액체금속의 말단을 뾰족한 원뿔 형상으로 2차 성형하는 단계;
를 포함하는 액체금속 전극 제조방법.

청구항 10

청구항 8에 있어서,
상기 액체금속은,
갈륨-인듐 공융 합금(eutectic gallium-indium alloy, EGaIn)으로 이루어진 액체금속 전극 제조방법.

청구항 11

청구항 8에 있어서,

상기 폴리머는,

광경화성 폴리머 또는 열경화성 폴리머인 액체금속 전극 제조방법.

발명의 설명

기술 분야

[0001] 본 발명은 액체금속 전극 및 이의 제조방법에 관한 것으로, 보다 상세하게는 유기막 표면 등에 마이크로 액체금속 전극을 패터닝하는 기술에 관한 것이다.

배경 기술

[0003] 유기물이 반도체 성질을 가질 수 있다는 사실이 밝혀지면서, 무기물에 의존하던 종래 전자산업의 패러다임이 유기물에 기반한 유기전자소자 개발로 변화하고 있다. 유기물은 무기물과 달리 다양한 종류의 신물질 개발에 용이하게 적용될 수 있고, 전도체와 반도체 절연체의 모든 성질을 가지고 있으며, 플렉시블(flexible) 소자로 구현 가능하기 때문에, 다양한 분야에서 연구가 진행되고 있다. 특히, 현재 응용 가능성이 높은 유기 반도체 분야로는 유기태양전지, 유기 전계효과 트랜지스터(OTFT), 유기전기발광소자(OLED), 유기 센서, 메모리 소자 등이 있다.

[0004] 그러나 유기전자소자 개발에서 공통적으로 겪는 두가지 문제가 있다. 첫째, 유기박막 위에 전극을 배치할 때에 고에너지 조건이 요구되므로, 유기박막이 손상된다는 것이다. 둘째는, 플렉시블 전자소자의 경우, 하기 선행기술문헌의 특허문헌에 개시된 바와 같이 무기물(실리콘) 전극을 사용하면, 반복적인 굽힘 응력(bending stress)에 의해 크랙(crack)이 발생하는 것이다. 이는 결국 소자의 성능 저하로 이어진다.

[0005] 이에 유기전자소자에 적용되는 종래 전극의 문제점을 해결할 수 있는 방안이 절실히 요구되고 있는 상황이다.

선행기술문헌

특허문헌

[0007] (특허문헌 0001) KR 10-2013-0106681 A

발명의 내용

해결하려는 과제

[0008] 본 발명은 상술한 종래기술의 문제점을 해결하기 위한 것으로, 본 발명의 일 측면은 소자의 전기적 특성에 영향이 없는 접합부 소재에 의해, 액체금속이 기재 상에 수백 마이크로제곱미터의 접촉면으로 계면접촉되어 형성되는 액체금속 전극을 제공하고자 하는 것이다.

[0010] 또한, 본 발명의 다른 측면은 상온 상압에서, 소자의 전기적 특성에 영향이 없는 접합부 소재를 이용해, 액체금속을 기재 상에 계면접촉시켜 untethered 형태의 액체금속 전극을 형성하는 액체금속 전극 제조방법을 제공하는 데 있다.

과제의 해결 수단

[0012] 본 발명에 따른 액체금속 전극은 기재 표면 상(on)에 형성되는 액체금속 전극에 있어서, 상기 액체금속 전극은, 액체금속을 포함하고, 소정의 형상으로 형성되며, 일단이 상기 기재 표면에 계면접촉되는 전도부; 및 폴리머를

포함하고, 상기 전도부의 일단 중 상기 기재와 비접촉된 비접촉 외면을 감싸면서, 상기 기재 표면에 결합되어, 상기 전도부를 상기 기재 표면에 접합시키는 접합부;를 포함한다.

- [0013] 또한, 본 발명에 따른 액체금속 전극에 있어서, 상기 액체금속은, 갈륨-인듐 공융합금(eutectic gallium-indium alloy, EGaIn)으로 이루어진다.
- [0014] 또한, 본 발명에 따른 액체금속 전극에 있어서, 상기 전도부는, 상기 액체금속의 표면이 산화되어 생성되고, 상기 액체금속을 소정의 형상으로 유지하는 산화물층;을 더 포함한다.
- [0015] 또한, 본 발명에 따른 액체금속 전극에 있어서, 상기 접합부의 일단은, 원추형으로, 상기 기재 표면을 향하여 뾰족하게 형성된다.
- [0016] 또한, 본 발명에 따른 액체금속 전극에 있어서, 상기 폴리머는, 유동성 있는 상태로 상기 기재 표면에 배치되어 상기 전도부의 비접촉 외면을 감싼 이후에 경화되는 광경화성 폴리머 또는 열경화성 폴리머이다.
- [0017] 또한, 본 발명에 따른 액체금속 전극에 있어서, 상기 기재 표면은, 단분자층(molecular monolayer)으로 형성된다.
- [0018] 또한, 본 발명에 따른 액체금속 전극에 있어서, 상기 액체금속 전극은, 분자전자소자 디바이스(molecular scale electronic device)의 마이크로 전극으로 사용된다.
- [0019] 한편, 본 발명에 따른 액체금속 전극 제조방법은 (a) 내부에 액체금속을 수용하는 시린지(syringe)를 이용해, 상기 액체금속이 소정의 형상으로 상기 시린지의 토출부에 뿜히도록, 상기 액체금속을 토출하여 성형하는 단계; (b) 상기 시린지를 이동시켜, 성형된 상기 액체금속의 일단을, 기재 표면 상(on)에 계면접촉시키는 단계; (c) 유동성 있는 폴리머를 상기 기재 표면 상(on)에 배치시키는 단계; (d) 상기 액체금속과 상기 기재 사이의 계면 접촉 영역이 넓히도록, 상기 폴리머를 이동시키는 단계; (e) 상기 폴리머를 경화시키는 단계; 및 (f) 상기 시린지를 상승시켜, 계면접촉된 상기 액체금속으로부터 상기 시린지를 분리하는 단계;를 포함한다.
- [0020] 또한, 본 발명에 따른 액체금속 전극 제조방법에 있어서, 상기 (a) 단계는, 상기 액체금속을 토출하여, 상기 시린지의 토출부에, 방울 형상으로 상기 액체금속을 1차 성형하는 단계; 상기 시린지를 이동시켜, 1차 성형된 상기 액체금속의 일단을, 소정의 기판에 접촉시키는 단계; 및 1차 성형된 상기 액체금속의 일단이 분리되도록, 상기 시린지를 상승시켜, 상기 시린지에 뿜힌 상기 액체금속의 말단을 뾰족한 원뿔 형상으로 2차 성형하는 단계;를 포함한다.
- [0021] 또한, 본 발명에 따른 액체금속 전극 제조방법에 있어서, 상기 액체금속은, 갈륨-인듐 공융 합금(eutectic gallium-indium alloy, EGaIn)으로 이루어진다.
- [0022] 또한, 본 발명에 따른 액체금속 전극 제조방법에 있어서, 상기 폴리머는, 광경화성 폴리머 또는 열경화성 폴리머이다.
- [0024] 본 발명의 특징 및 이점들은 첨부도면에 의거한 다음의 상세한 설명으로 더욱 명백해질 것이다.

이에 앞서 본 명세서 및 청구범위에 사용된 용어나 단어는 통상적이고 사전적인 의미로 해석되어서는 아니 되며, 발명자가 그 자신의 발명을 가장 최선의 방법으로 설명하기 위해 용어의 개념을 적절하게 정의할 수 있다는 원칙에 입각하여 본 발명의 기술적 사상에 부합하는 의미와 개념으로 해석되어야만 한다.

발명의 효과

- [0028] 본 발명에 따르면, 액체금속을 기반으로 전극이 형성되므로, 무기물 전극에 비해 반복적인 굽힘 응력에 대해 안정적으로 전극 성능을 유지할 수 있다.
- [0030] 또한, 상압 상온 조건에서, 소자의 전기적 특성에 영향이 없는 접합부 소재에 의해 액체금속이 유기막에 접합되고, untethered 형태로 전극을 형성하므로, 전극 형성에 따른 유기막의 손상을 방지할 수 있고, 나아가 원하는

면적으로, 원하는 위치에 전극 어레이를 패터닝할 수 있다.

도면의 간단한 설명

[0032]

도 1은 본 발명의 실시예에 따른 액체금속 전극의 측면도이다.

도 2는 도 1의 원 A를 확대한 확대도이다.

도 3 내지 도 5는 본 발명의 실시예에 따른 액체금속 전극 제조방법의 공정도이다.

도 6은 본 발명의 실시예에 따라 EGaIn을 기반으로 액체금속 전극을 제조하는 공정을 개략적으로 도시한 공정도이다.

도 7 및 도 8은 도 6에 따라 제조된 액체금속 전극의 현미경 이미지(microscopic image)이다.

도 9는 도 6에 따른 공정 동안 측정된 터널링 전류 밀도-바이어스(J-V) 그래프이다.

도 10은 도 6에 따라 제조된 액체금속 전극에 대해 1000회에 걸쳐 측정된 터널링 전류 밀도 그래프이다.

도 11은 도 6에 따라 제조된 액체금속 전극에 대해 대기 중에서 소정의 시간이 경과할 때마다 측정된 터널링 전류 밀도-바이어스(J-V) 그래프이다.

도 12는 본 발명의 실시예에 따른 액체금속 전극 제조방법에 따라 ITO 상에 "KU" 문자 형태로 액체금속 전극 어레이를 패터닝한 사진이다.

도 13은 도 12에 따른 공정 동안 측정된 액체금속 전극 집합에 대한 터널링 전류 밀도의 히스토그램(histogram)이다.

도 14는 본 발명의 실시예에 따라 Ag^{TS} 상에 형성된 SC_7CO_2H SAM 위에, EGaIn 기반으로 형성된 3×3 액체금속 전극 어레이의 사진이다.

도 15는 도 14의 어레이를 구성하는 액체금속 전극 집합에 대한 터널링 전류 밀도의 히스토그램(histogram)이다.

도 16은 본 발명에 따른 액체금속 전극 집합을 통한 터널링 전류의 분자 길이 의존성을 확인하기 위해 사용된 SAM 분자를 도시한 도면이다.

도 17은 도 16의 SAM 분자 길이에 대한 터널링 전류 밀도 그래프이다.

도 18은 도 16에 따른 SAM 분자와의 접촉-비접촉 사이클 수에 따른 터널링 전류 밀도 그래프이다.

도 19는 본 발명의 실시예에 따라 Au^{TS} 상에 형성된 $SC_{11}BIPY$ SAM 위에, EGaIn 기반으로 형성된 액체금속 전극 집합의 정류비(rectification ration)를 나타내는 그래프이다.

도 20은 다양한 온도에서 본 발명에 따른 액체금속 전극 집합에 대해 측정된 SAM 분자 길이에 대한 터널링 전류 밀도 그래프이다.

도 21은 기체가 벤딩(bending)되는 동안 본 발명에 따른 액체금속 전극 집합에 대해 측정된 벤딩 반경에 대한 터널링 전류 밀도 그래프이다.

도 22는 본 발명에 따른 액체금속 전극 집합에 대한 벤딩 사이클 테스트에서 측정된 터널링 전류 밀도 그래프이다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

[0033]

본 발명의 목적, 특정한 장점들 및 신규한 특징들은 첨부된 도면들과 연관되어지는 이하의 상세한 설명과 바람직한 실시예들로부터 더욱 명백해질 것이다. 본 명세서에서 각 도면의 구성요소들에 참조번호를 부가함에 있어서, 동일한 구성 요소들에 한해서는 비록 다른 도면상에 표시되더라도 가능한 한 동일한 번호를 가지도록 하고 있음에 유의하여야 한다. 이하, 본 발명을 설명함에 있어서, 본 발명의 요지를 불필요하게 흐릴 수 있는 관련된 공지 기술에 대한 상세한 설명은 생략한다.

- [0035] 이하, 첨부된 도면을 참조하여 본 발명의 바람직한 실시형태를 상세히 설명하기로 한다.
- [0037] 도 1은 본 발명의 실시예에 따른 액체금속 전극의 측면도이고, 도 2는 도 1의 원 A를 확대한 확대도이다.
- [0038] 도 1 및 도 2에 도시된 바와 같이, 본 발명의 실시예에 따른 액체금속 전극은, 기재(10) 표면 상(on)에 형성되는 액체금속 전극으로서, 액체금속(21)을 포함하고, 소정의 형상으로 형성되며, 일단이 기재(10) 표면에 계면접촉되는 전도부(20); 및 폴리머를 포함하고, 전도부(20)의 일단 중 기재(10)와 비접촉된 비접촉 외면을 감싸면서, 기재(10) 표면에 결합되어, 전도부(20)를 기재(10) 표면에 접합시키는 접합부(30);를 포함한다.
- [0040] 본 발명은 전기전자소자에 사용되는 전극에 관한 것이다. 최근 들어 각광받고 있는 유기전자소자 개발에 있어, 전극을 배치할 때 요구되는 고에너지 조건에 의해 유기막이 손상되고, 반복적인 굽힘 응력에 의해 무기물 전극에 크랙(crack)이 발생하여 소자 성능을 저하시키는 문제가 발생한다. 또한, 분자전자소자 디바이스(molecular scale electronic device)를 제조하기 위해 일반적으로 분자와 전극 간 나노미터 규모의 단일 전극 접합을 사용하는데, 이 경우 복잡한 장비가 필요하다. 이를 대체하여 유기-전극 접촉을 형성하기 위한 방안으로서 나노리소그래프 공정을 사용할 수 있지만, 이에 의하면 유기 표면 상에 직접 금속이 증착되어 작동 디바이스의 생산 수율이 저하되고 재현성이 떨어지는 전기적 거동을 보이는 문제가 생긴다. 이에 상온 상압의 대기 조건에서 간단한 공정으로, 마스크가 필요 없이, 유기막과 같은 단분자층 등에 직접 적용할 수 있는 본 발명에 따른 액체금속 전극이 안출되었다.
- [0041] 여기서, 본 발명에 따른 액체금속 전극은 마이크로 전극으로서 분자전자소자 디바이스에 적용될 수 있는데, 반드시 이에 한정하여 적용되어야 하는 것은 아니고, 유기전자소자를 포함한 다양한 전기전자소자의 전극에 활용될 수 있다.
- [0043] 구체적으로, 본 발명에 따른 액체금속 전극은, 전도부(20), 및 접합부(30)를 포함한다.
- [0044] 전도부(20)는, 액체금속(21)을 포함하고, 소정의 형상으로 형성되어, 그 일단이 기재(10) 표면에 계면접촉된다.
- [0045] 여기서, 기재(10)는 전도부(20) 및 접합부(30)를 지지하는 물체로서, 유기전기전자소자를 구성하는 유기막일 수 있고, 다양한 전기전자소자의 기관, 박막 등이어도 무방하며, 소재에 특별한 제한이 없으므로, 유기물, 무기물, 또는 유무기 하이브리드 소재 등으로 이루어질 수 있다. 또한, 전도부(20)와 접촉되는 기재(10)의 표면만이 단분자층(molecular monolayer)으로 형성될 수도 있다.
- [0046] 전도부(20)는 액체금속(21)을 포함한다. 액체금속(21)은 액체상태로 되어 있는 금속을 의미하고, 전기 전도성을 가지므로, 기재(10)를 통해 전류를 유출 유입시킬 수 있다. 이러한 액체금속(21)의 일례로, 갈륨-인듐 공융합금(eutectic gallium-indium alloy, EGaIn)을 사용할 수 있다. 갈륨-인듐 공융합금은 녹는점이 약 15.5℃로 상온에서 액체의 물성을 가진다. 갈륨-인듐 공융합금은 구리 등의 고체 금속과는 달리 외부의 물리적 힘에 의해서 쉽게 모양이 변형되고 회복될 수 있기 때문에, 고체 금속을 대체하여, 특히 플렉시블(flexible) 전자소자 등에 활용 가능하다. 한편, 전도부(20)는 액체금속(21)만으로 이루어질 수 있지만, 전기적 및 기계적 특성을 향상시키기 위해, 추가적으로 이에 다른 물질이 혼합될 수도 있다.
- [0047] 전도부(20)는 소정의 형상으로 형성되고, 기재(10)의 표면에 수백 마이크로 제곱미터 등의 면적으로 계면접촉될 수 있다. 여기서, 전도부(20)의 형상은 방울 형상, 구 형상, 기둥 형상, 또는 원추형 등 다양한 형상으로 형성될 수 있다. 특히, 최초 방울 형상의 액체금속(21)을 분리하여 원추형으로 형성될 수 있는데 (이에 대해서는 후술함), 이때에는 방울 형상에 비해 상대적으로 작은 접촉 면적(contact area)을 가지므로, 이를 통해 접합의 작동 수율을 향상시킬 수 있다. 여기서, 원추형은 계면접촉된 일단이 뾰족하게 형성된 형태를 의미한다. 액체금속(21)의 형상은 그 자체의 표면장력 등과 같은 성질에 기인하거나, 다른 첨가물에 의해 의존하여 형성될 수 있다. 한편, 이와 달리 액체금속(21)이 대기에 노출되면 그 표면에 산화물층(23)이 생성되면서 일정한 형상으로 유지될 수도 있다(도 2 참고). 일례로, EGaIn이 공기에 노출되면 산화저항성 산화물층(23)인 Ga_2O_3 가 EGaIn의 표면에 생성되고, 그 산화물층(23)에 의해 EGaIn이 소정의 기하학적 형태를 형성·유지하여, 궁극적으로 본 발명에 따른 미세 전극을 구현할 수 있다.

- [0048] 한편, 전도부(20)는 기재(10) 상에 계면접촉되지만, 그 자체로 기재(10)에 고정되는 것은 아니고, 접합부(30)에 의해 접합된다.
- [0050] 접합부(30)는 전도부(20)를 기재(10)에 접합시키는 부분이다. 이러한 접합부(30)는 전도부(20)의 비접촉 외면을 감싸면서, 기재(10)에 결합되어 전도부(20)를 기재(10)에 접합시킨다. 여기서, 전도부(20)의 비접촉 외면은 기재(10) 표면에 계면접촉되는 전도부(20)의 일단을 구성하는 외면으로서, 기재(10) 표면과 직접 접촉되지 않고 노출된 외면을 의미한다. 즉, 접합부(30)가 전도부(20)의 일부 영역을 캡슐화하면서 기재(10)에 계면접촉된 상태로 전도부(20)를 접합 고정한다.
- [0051] 이러한 접합부(30)는 소자의 전기적 특성에 영향을 주지 않는 소재로서, 폴리머를 포함한다. 여기서 폴리머는 그 자체로서 비전기전도성을 가지는 것은 물론, 접합부(30)에 의해 캡슐화되지 않은 상태의 전도부(20)로 기재(10)에 계면접촉되는 액체금속 전극 접합(이하 "tethered junction", 또는 "맺힌 접합"이라 함)에서의 전기적 특성에 영향을 주지 않아야 한다. 구체적으로, tethered junction은, 시린지(syringe)를 통해 액체금속을 토출하되, 시린지의 토출부에 액체금속이 맺힌 상태로, 기재(10) 표면에 계면접촉되어 형성된 접합 형태이다. 이와 대조적으로, 접합부(30)에 의해 전도부(20)가 캡슐화되면서 기재(10) 상에 접합된 본 발명에 따른 액체금속 전극 접합은, "untethered junction", 또는 "분리된 접합"으로 정의하여 이하에서 사용한다. 따라서, 접합부(30)의 소재로서 사용되는 폴리머가 소자의 전기적 특성에 영향을 주지 않으므로, tethered junction(맺힌 접합)와 untethered junction(분리된 접합)의 전기적 특성은 거의 구별되지 않는다.
- [0052] 이러한 폴리머는, 유동성 있는 상태에 있다가 빛이나 열 등에 의해 경화되는 광경화성 폴리머, 또는 열경화성 폴리머일 수 있다. 이 경우, 폴리머는 경화되기 전에는, 유동성을 가지므로 그 상태에서 기재(10) 표면에 배치되어 전도부(20)의 비접촉 외면을 감싸고(캡슐화하고), 이후에 경화되어 접합부(30)를 형성한다. 여기서, 광경화성 폴리머의 일례로, 자외선(UV) 경화형 접착제 등과 같은 광경화형 접착제(optical adhesive)를 사용할 수 있다.
- [0054] 이하에서는 본 발명에 따른 액체금속 전극 제조방법에 설명한다.
- [0055] 도 3 내지 도 5는 본 발명의 실시예에 따른 액체금속 전극 제조방법의 공정도이다.
- [0056] 도 3 및 도 4에 도시된 바와 같이, 본 발명에 따른 액체금속 전극 제조방법은, (a) 내부에 액체금속(21)을 수용하는 시린지(syringe, 1)를 이용해, 액체금속(21)이 소정의 형상으로 시린지(1)의 토출부에 맺히도록, 액체금속(21)을 토출하여 성형하는 단계(S100); (b) 시린지(1)를 이동시켜, 성형된 액체금속(21)의 일단을, 기재(10) 표면 상(on)에 계면접촉시키는 단계(S200); (c) 유동성 있는 폴리머(31)를 기재(10) 표면 상(on)에 배치시키는 단계; (d) 액체금속(21)과 기재(10) 사이의 계면접촉 영역이 덮히도록, 폴리머(31)를 이동시키는 단계; (e) 폴리머(31)를 경화시키는 단계; 및 (f) 시린지(1)를 상승시켜, 계면접촉된 액체금속(21)으로부터 시린지(1)를 분리하는 단계;를 포함한다.
- [0058] 전술한 본 발명에 따른 액체금속 전극은 아래의 방법에 의해 제조된다. 본 발명에 따른 액체금속 전극에 대해서는 상술하였는바, 중복되는 사항에 대해서는 설명을 생략하거나 간단하게만 기술한다.
- [0060] 본 발명에 따른 액체금속 전극을 제조하기 위해서, 먼저 소정의 형상으로 액체금속(21)을 성형한다(S100). 여기서, 액체금속(21)의 성형 및 후속하는 배치 등의 공정은 시린지(syringe, 1) 및 마이크로매니퓰레이터(micromanipulator, 도 6 참조)를 사용할 수 있다. 여기서, 시린지(1)는 액체금속(21)을 내부에 수용하여, 토출부를 통해 액체금속(21)을 소량으로 토출할 수 있는 기기로서, 대표적으로는 주사기 형태로 형성될 수 있지만, 그 형태 및 구성이 특별히 한정될 필요는 없다. 마이크로매니퓰레이터는 시린지(1)를 이동시킬 수 있는 미세조작장치로서, 좌우 평면 상의 x축 및 y축, 그리고 그 평면에 대한 수직방향인 z축으로 시린지(1)를 이동시킬 수 있다.
- [0061] 액체금속(21)을 성형하기 위해서는, 내부에 액체금속(21)이 수용된 시린지(1)를 준비하고, 소량의 액체금속(21)을 토출한다. 이때, 액체금속(21)은 시린지(1)로부터 분리되는 것이 아니고, 시린지(1)의 토출부에 맺힌 상태

로 성형된다. 여기서, 토출부에 맺힌 액체금속(21)은 기재(10) 상에 수백 마이크로제곱미터 등의 다양한 면적으로 접촉되는바, 액체금속(21)의 토출양 및 그 크기는 접촉 면적을 고려하여 정할 수 있다. 한편, 시린지(1)의 토출부는 니들(needle)을 사용할 수 있지만, 반드시 이에 한정되는 것은 아니고, 액체금속(21)이 토출되어 맺힐 수 있는 형상으로 형성되지만 하면, 어떠한 구성으로 형성되어도 무방하다. 여기서, 액체금속(21)은 갈륨-인듐 공융합금(eutectic gallium-indium alloy, EGaIn)으로 이루어질 수 있다.

[0063] 소정의 형상으로 액체금속(21)이 시린지(1)의 토출부에 맺혀서 성형되면, 그 액체금속(21)을 기재(10) 상에 접촉시킨다(S200). 기재(10)에 관해서는 전술하였는바, 설명을 생략한다. 여기서, 마이크로매니퓰레이터를 사용해 시린지(1)를 이동시킴으로써, 시린지(1)에 맺힌 액체금속(21)을 기재(10)에 계면접촉시킬 수 있다. 이렇게 접합부(30) 없이, 액체금속(21)이 시린지(1)에 붙어있는 상태로 기재(10)에 접합된 형태가 전술한 tethered junction(맺힌 접합)에 해당한다.

[0065] 액체금속(21)이 기재(10)에 접촉된 후에는, 유동성 있는 폴리머(31)를 기재(10)에 배치시킨다(S300). 이때, 폴리머(31)는 유동성을 가지므로, 파이펫(pipette)을 이용해 일정량을 취한 후, 액체금속(21) 주변에 폴리머(31)를 떨어뜨려 배치할 수 있다. 다만, 폴리머(31)를 떨어뜨리는 위치가 반드시 특정 위치에 한정되는 것은 아니다. 여기서, 폴리머(31)는 전술한 바와 같이, 유동성 있는 상태에 있다가 빛이나 열 등에 의해 경화되는 광경화성 폴리머, 또는 열경화성 폴리머일 수 있다.

[0067] 폴리머(31)가 배치되면, 액체금속(21)과 기재(10) 사이의 계면접촉 영역이 넓히도록, 즉 액체금속(21) 외면의 일부 영역이 캡슐화되도록, 폴리머(31)를 이동시킨다(S400).

[0069] 다음에는, 폴리머(31)를 경화시킨다(S500). 폴리머(31)가 광경화성 폴리머를 포함하거나, 또는 광경화형 접착제를 사용하는 경우에는, 자외선(UV) 등과 같은 광을 조사함으로써, 폴리머(31)를 경화시킬 수 있고, 그 외의 소재로 이루어진 경우에는 그 소재의 특성에 따라 경화시킬 수 있다. 이때, 폴리머(31)가 기재(10)와 액체금속(30)을 결합시키면서, 결합부(30)가 형성된다.

[0071] 마지막으로, 기재(10)에 접합된 액체금속(21)으로부터 시린지(1)를 분리한다(S600). 여기서, 마이크로매니퓰레이터를 사용해 시린지(1)를 위로 들어올려, 시린지(1)를 분리할 수 있다. 이로써, 액체금속(21)이 전도부(20)를 형성하게 된다. 이렇게 시린지(1)가 분리된 접합이 전술한 "untethered junction", 또는 "분리된 접합"에 해당한다.

[0073] 한편, 전도부(20)의 형상은, 액체금속(21) 성형 단계에서의 액체금속(21) 형상에 의존하게 되는데, 이때 액체금속(21) 및 전도부(20)의 형상은 방울 형상, 구 형상, 기둥 형상, 또는 원추형 등 다양한 형상으로 형성될 수 있다.

[0075] 이하에서는, 도 5를 참고로, 액체금속을 원추형으로 성형(S100)하는 일 실시예에 대해 설명한다.

[0076] 원추형의 전도부를 형성하기 위해서는, 방울 형상의 액체금속이 시린지의 토출부에 맺히도록, 시린지에서 액체금속을 토출하여, 액체금속을 1차 성형한다. 이때, 시린지는 마이크로매니퓰레이터에 고정될 수 있다.

[0078] 액체금속 방울(EGaIn drop)을 생성한 후에는, 이와 화학적 상호 작용이 가능한 표면을 갖는 소정의 기판(substrate)에, 마이크로매니퓰레이터 등을 이용해 액체금속 방울의 일단을 접촉시킨다. 여기서, 소정의 기판의 표면은 금이나 은으로 코팅될 수 있다.

- [0080] 다음으로, 마이크로매니퓰레이터를 이용하여 시린지를 천천히 상승시킨다. 이때, 1차 성형된 방울 형상의 액체 금속의 일단이 분리되면서, 원추형으로 액체금속이 2차 성형된다. 한편, 원추형 말단에 의도치 않은 필라멘트가 생성된 경우에는, 그 말단 표면을 평평하게 다지기 위해서, 깨끗한 실리콘 웨어퍼 표면 등에 여러 차례 접촉과 분리를 반복할 수 있다. 이렇게 형성된 원추형 전도부의 경우 방울 형태에 비해서 상대적으로 작은 접촉 면적을 가지고 이를 통해 접합의 작동 수율이 향상된다. 다만, 본 발명에 따른 액체금속 전극이 반드시 이러한 원추형에 한정되는 것은 아니다.
- [0082] 종합적으로, 본 발명에 따르면, 액체금속을 기반으로 전극이 형성되므로, 무기물 전극에 비해 반복적인 굽힘 응력에 대해 안정적으로 성능을 유지할 수 있다. 또한, 상압 상온 조건에서, 소자의 전기적 특성에 영향이 없는 접합부 소재에 의해 액체금속이 유기막 등과 같은 기체 표면에 접합되고, untethered 형태로 전극을 형성하므로, 전극 형성에 따른 유기막의 손상을 방지할 수 있고, 나아가 원하는 면적으로, 원하는 위치에 전극 어레이를 패터닝할 수 있으며, 향후 직접 쓰는 방식으로 기체 표면에 전극을 패터닝하는 기술로 발전할 수 있다.
- [0084] 이하에서는 구체적 실시예 및 평가예를 통해 본 발명을 보다 상세하게 설명한다.
- [0086] 실시예 1
- [0087] 도 6은 본 발명의 실시예에 따라 EGaIn을 기반으로 액체금속 전극을 제조하는 공정을 개략적으로 도시한 공정도이다.
- [0088] 도 6 및 전술한 액체금속 제조방법을 참고로, 시린지 및 마이크로매니퓰레이터를 이용하여, EGaIn을 기반으로 원추형 팁을 형성하고, 자기조립단일층(self assembled monolayer, SAM)에 그 원추형 팁을 배치하여 접합을 형성했다. 여기서, 원추형 팁은 EGaIn의 표면이 산화되어 $\text{Ga}_2\text{O}_3/\text{EGaIn}$ 형태로 형성되고, SAM은 Au^{TS} 또는 Ag^{TS} 기판 상에 $\text{SC}_{11}\text{CO}_2\text{H}$ 로 형성하였다.
- [0089] 다음에 광경화성 폴리머 방울($\sim 2 \mu\text{g}$)을 $\text{Ag}^{\text{TS}}/\text{SC}_{11}\text{CO}_2\text{H}/\text{Ga}_2\text{O}_3/\text{EGaIn}$ 접합(여기서, '/'는 반데르발스 접촉, van der Waals contact) 주위에 떨어뜨렸다. 여기서, 광경화성 폴리머는 320 ~ 380 nm의 장파장 자외선(UV)에 반응하는 NOA 081을 상업용 벤더에서 구매하여 사용하였다.
- [0090] 그 다음 광경화성 폴리머에 의해 그 접합이 덮이도록 하고, 핸드헬드 램프(handheld lamp)를 사용해 수 초 동안(2 ~ 5 s) UV를 조사하여 광경화성 폴리머를 경화시켰다. 이때, 원추형 팁은 경화된 폴리머(PP)에 의해 단단히 고정되고, 마지막으로 마이크로매니퓰레이터를 사용하여 시린지를 상승시킴으로써, untethered 형태의 $\text{Ga}_2\text{O}_3/\text{EGaIn}$ 접촉을 형성하는 액체금속 마이크로 전극을 제조하였다.
- [0092] 평가예 1-1
- [0093] 도 7 및 도 8은 도 6에 따라 제조된 액체금속 전극의 현미경 이미지(microscopic image)로서, 도 7은 측면에서 바라본 이미지이고, 도 8은 비스듬한 방향에서 바라본 이미지이다.
- [0094] 상기 실시예 1에 의해 제조된 액체전극 전극에 대해, 측면(도 7 참고), 및 비스듬한 방향(도 8 참고)에서 액체 전극 전극을 광학 현미경으로 촬영하고, 그 이미지를 분석하였다.
- [0095] 그 결과, $\text{Ga}_2\text{O}_3/\text{EGaIn}$ 원추형 팁은 광경화성 폴리머에 의해 성공적으로 캡슐화되고, 기하학적으로 안정된 형태로 형성·유지됨을 확인하였다. 다만, 이러한 결과는 원추형 팁에 한정되는 것은 아니고, 구형의 방울 등과 같은 다양한 형태로 EGaIn 전극을 형성하는 데에도 적용될 수 있다.
- [0096] 한편, 광경화성 폴리머에 의해 캡슐화된 EGaIn 전극의 접촉 면적을 캡슐화 전과 비교한 결과, 현저한 차이가 없었다. 이는 광경화성 폴리머가 EGaIn 전극의 기하학적 접촉 영역에 어떠한 영향도 주지 않음을 나타낸다.

- [0098] 평가예 1-2
- [0099] 도 9는 도 6에 따른 공정 동안 측정된 터널링 전류 밀도-바이어스(J-V) 그래프이다. 여기에서 터널링 전류 밀도는 로그 스케일(log scale)로 표시하고, 바이어스 전압은 ± 0.5 V이다.
- [0100] 실시예 1에 따라 액체금속을 제조하는 과정에서, tethered junction에서와, untethered junction에서의 바이어스 전압에 대한 터널링 전류 밀도(J)를 각각 측정하고, 그 결과를 도 9에 나타내었다. 결과를 분석해 보면, 광경화성 폴리머 캡슐화 전과 후의 전류 밀도에 유의미한 변화가 관찰되지 않는다. 이는 EGaIn 전극을 가로지르는 터널링 전류 밀도가 폴리머 캡슐화에 의해 영향을 받지 않고, 대기 중에서의 폴리머에 의한 계면 환경의 변화가 EGaIn 기반 접합의 터널링 특성에 영향을 미치지 않는다는 것을 나타낸다.
- [0102] 평가예 1-3
- [0103] 도 10은 도 6에 따라 제조된 액체금속 전극에 대해 1000회에 걸쳐 측정된 터널링 전류 밀도 그래프이고, 도 11은 도 6에 따라 제조된 액체금속 전극에 대해 대기 중에서 소정의 시간이 경과할 때마다 측정된 터널링 전류 밀도-바이어스(J-V) 그래프이다.
- [0104] 실시예 1에 따라 제조된 untethered junction에 대해 1000번의 사이클(cycle)로 터널링 전류 밀도를 측정하였으나 큰 변화가 없었다(도 10 참조).
- [0105] 또한, 실시예 1에 따라 제조된 untethered junction을 24시간, 48시간, 72시간 동안 공기에 노출하여 터널링 전류 밀도를 측정한 결과, 시간 경과에 따른 전류 밀도의 변화도 관찰되지 않았다(도 11 참조).
- [0106] 이로써, 본 발명에 따른 액체금속 전극을 장기간 사용하더라도 그 성능이 저하되지 않는다는 사실을 알 수 있다.
- [0108] 실시예 2
- [0109] 도 12는 본 발명의 실시예에 따른 액체금속 전극 제조방법에 따라 ITO 상에 "KU" 문자 형태로 액체금속 전극 어레이를 패터ن화한 사진이다.
- [0110] 본 실시예에서는 도 12와 같이, ITO 상에, 실시예 1과 동일한 방식으로, EGaIn과 광경화성 폴리머를 사용해 "KU" 문자 형태로 ITO//Ga₂O₃/EGaIn 형태의 액체금속 전극 어레이를 패터ن화하였다.
- [0112] 평가예 2
- [0113] 상기 실시예 2와 같이 액체금속이 패터ن화되는 것으로부터, 본 발명에 따른 액체금속 전극이 마스크 없이도 대면적 기판($\mu\text{m} \sim \text{cm}$)에서 임의의 패터으로 형성될 수 있음을 알 수 있다.
- [0114] 도 13은 도 12에 따른 공정 동안 측정된 액체금속 전극 접합에 대한 터널링 전류 밀도의 히스토그램(histogram)으로, 실시예 2의 과정에서 액체금속 전극 접합에 대해 +0.5 V에서 측정된 터널링 전류 밀도(J)의 측정치이다. 여기서, 모든 접합 중 어느 것도 단락되지는 않았고, tethered junction에서와, untethered junction에서의 전류 밀도에 유의미한 차이가 관찰되지 않았다. 이는 untethering 처리 방법이 재현 가능하고 견고하다는 것을 나타내며, 직접 쓰는 방식으로 분자 접합이 프린팅될 수 있음을 시사한다.
- [0116] 실시예 3
- [0117] 도 14는 본 발명의 실시예에 따라 Ag^{TS} 상에 형성된 SC₇CO₂H SAM 위에, EGaIn 기반으로 형성된 3×3 액체금속 전극 어레이의 사진이다.
- [0118] 본 실시예에서는 실시예 1 및 2와 동일하게, Ag^{TS} 기판 상에 형성된 SC₇CO₂H SAM을 형성하고, 그 위에 EGaIn 기

반으로 3×3 액체금속 전극 어레이를 형성하였다.

[0120] 평가예 3

[0121] 도 15는 도 14의 어레이를 구성하는 액체금속 전극 접합에 대한 터널링 전류 밀도의 히스토그램(histogram)이다.

[0122] 실시예 3에 의해 형성된 접합에 대해 +0.5 V에서 터널링 전류 밀도(J)를 측정하고, 그 결과를 도 15에 나타냈다.

[0123] 그 결과, 모든 접합은 정상적으로 기능하였고, 각각에 대한 전류 밀도 값은 서로 구별할 수 없을 정도의 유사한 특성을 보였다.

[0125] 실시예 4

[0126] 도 16은 본 발명에 따른 액체금속 전극 접합을 통한 터널링 전류의 분자 길이 의존성을 확인하기 위해 사용된 SAM 분자를 도시한 도면이다.

[0127] 본 실시예에서는, 도 16과 같이, 서로 다른 사슬 길이를 가지는 mercaptoalkanoic acids($\text{HS}(\text{CH}_2)_n\text{CO}_2\text{H}$, $n=8, 10, 12$ 및 16일 때에, 각각 C8, C10, C12 및 C16으로 표시)을 사용하여 SAM을 형성하고, 각각의 SAM 위에, 실시예 1과 동일한 방식으로, EGaIn과 광경화성 폴리머를 사용해 액체금속 전극을 제조하였다.

[0129] 평가예 4-1

[0130] 도 17은 도 16의 SAM 분자 길이에 대한 터널링 전류 밀도 그래프이다.

[0131] 액체금속 전극 접합을 통한 터널링 전류의 분자 길이 의존성을 확인하기 위해, 실시예 4에서 제조된 액체금속 전극에 대해 터널링 전류 밀도(J)를 측정하고, 그 결과를 도 17에 나타냈다.

[0132] 본 평가예는 untethered EGaIn 접촉에 기초한 터널링 플랫폼(tunneling platform)을 확립하기 위해, $J=J_0 \times \exp(-\beta d)$ 으로 표현되는 Simmons 모델을 이용하여, 터널링 장벽의 폭(width of the tunneling barrier)에 대한 터널링 전류 밀도의 의존성을 조사하는 것으로, $J_0(\text{A}/\text{cm}^2)$ 는 터널링 주입 전류 밀도이고, β 는 터널링 붕괴상수(tunneling decay coefficient, 탄소 당 C^{-1})이고, 분자 길이(탄소수)에 대한 $\log|J|$ 의 플롯(plot)으로부터 β (기울기)와 J_0 (y 절편)의 값을 추출할 수 있다. 여기서, β 와 J_0 의 값은 SAM과 분자-전극 계면의 분자 백본(molecular backbone)의 전자 구조에 의해 결정되며, 이 값은 서로 다른 방법으로 형성된 동일한 분자를 포함하는 접합을 비교하는 데 사용할 수 있다.

[0133] 도 17은 알킬 사슬 길이(alkyl chain length)의 함수로서 $J(\pm 0.5 \text{ V})$ 의 플롯을 도시한 것으로, β 와 J_0 의 값은 각각 $\sim 1.08 \text{ C}^{-1}$ 과 $\sim 10^{4.4} \text{ A}/\text{cm}^2$ 였고, 그 값들은 tethered EGaIn 접합에서 추정된 값과 일치한다. 이러한 결과는 untethered 접촉이 양자 터널링 영역에서 적절하게 기능하고, tethered 및 untethered junction에 대한 전기적 특성에 차이가 없음을 나타낸다.

[0135] 평가예 4-2

[0136] 도 18은 도 16에 따른 SAM 분자와의 접촉-비접촉 사이클 수(number of cycle)에 따른 터널링 전류 밀도 그래프이다.

[0137] 본 평가예에서는 untethered EGaIn 접합에 대한 전기적 접촉의 반복성과 관련한 성능을 측정하고, C8, C10, C12 및 C16 분자 접합의 J-V 특성을 도 18에 도시하였다.

[0138] 그 결과, 터널링 전류 밀도 값(J)은 단일 접합에서 반복적인 접촉 및 비접촉에서도 일정하게 유지되는데, 이는 반복적으로 인가되는 전압 및 응력(stress) 하에서도 전류 밀도가 현저하게 저하되지 않음을 나타낸다.

- [0140] 실시예 5
- [0141] 본 실시예에서는, 2,2-Bipyridine-terminated n-alkanethiol(SC₁₁BIPY) SAM 위에, 실시예 1과 동일한 방식으로, EGaIn과 광경화성 폴리머를 사용해 3×3 untethered junctions 어레이를 제작하였다.
- [0143] 평가예 5
- [0144] 도 19는 본 발명의 실시예에 따라 Au^{TS} 상에 형성된 SC₁₁BIPY SAM 위에, EGaIn 기반으로 형성된 액체금속 전극 집합의 정류비(rectification ration, r)를 나타내는 그래프이다.
- [0145] untethered EGaIn 집합은 분자 정류 (molecular rectification)와 관련이 있는바, 본 평가예에서는 실시예 5에서 제작된 어레이를 구성하는 모든 집합에 대해 정류비를 측정하였다.
- [0146] 그 결과, 도 19와 같이, 형성된 집합 모두에서 재현 가능한 r 값 ($\log|r| = 1.9 \pm 0.3$)이 나타났는데, 그 값은 tethered 집합($\log|r| = 1.9 \pm 0.3$)과 일치한다.
- [0148] 평가예 6-1
- [0149] 도 20은 다양한 온도에서 본 발명에 따른 액체금속 전극 집합에 대해 측정된 SAM 분자 길이에 대한 터널링 전류 밀도 그래프이다.
- [0150] 본 평가예에서는 실시예 4에서 제조된 액체금속 전극을 사용하여, untethered 형태의 Ag^{TS}/SC_nCO₂H//Ga₂O₃/EGaIn 집합을 극저온 프로브 스테이션(cryogenic probe station)에 로드(load)하고 진공($\sim 10^{-4}$ torr) 하의 저온(300 ~ 100 K)에서 온도를 변화시키면서 J-V를 측정하였다.
- [0151] 그 결과, 집합의 J-V 특성은 온도에 독립적이었으며, β 및 J₀ 값의 변화도 관찰되지 않았다. 이는, untethered Ga₂O₃/EGaIn 집합이 저온 환경에 적합한 디바이스에도 적용될 수 있음을 나타낸다.
- [0153] 평가예 6-2
- [0154] 도 21은 기체가 벤딩(bending)되는 동안 본 발명에 따른 액체금속 전극 집합에 대해 측정한 벤딩 반경에 대한 터널링 전류 밀도 그래프이고, 도 22는 본 발명에 따른 액체금속 전극 집합에 대한 벤딩 싸이클 테스트에서 측정한 터널링 전류 밀도 그래프이며, 도 23은 기체가 평평한 경우와 구부러진 경우에 본 발명에 따른 액체금속 전극 집합에 대해 측정한 시간대별 터널링 전류 밀도 그래프이다.
- [0155] 본 평가예에서는, 실시예 4에서, C8 및 C12 SAM에 형성된 액체금속 전극에 대해, 벤딩 테스트를 실시하고, 그 테스트 동안 터널링 전류 밀도(J)를 측정하였다.
- [0156] 그 결과, 도 21과 같이, 기체가 벤딩 반경이 ∞ (평면, flat)에서 2.2 mm까지 점진적으로 구부러지더라도, 터널링 전류 밀도 값은 일정하게 유지되었다.
- [0157] 또한, 반복적인 벤딩 싸이클(bending cycle)에서도 터널링 전류 밀도는 크게 변하지 않았다(도 22 참조).
- [0158] 한편, untethered EGaIn 집합을 기반으로 하는 C8 분자 집합(molecular junction)의 안정성을, 단시간 간격으로($\Delta t=10$ s)으로 $1 \sim 10^3$ s 동안 굽히고 펴는 조건에서 테스트하였는데, 성능 저하가 관찰되지 않았다(도 23 참조).
- [0159] 이러한 결과를 종합하면, 본 발명에 따른 액체금속 전극은 반복적인 벤딩 조건에서도 균일하고 안정적인 전기적 특성을 가지며, 이를 통해 플렉시블(flexible) 전자 디바이스에 안정적인 전극으로 제공될 수 있음을 나타낸다.
- [0161] 이상 본 발명을 구체적인 실시예를 통하여 상세히 설명하였으나, 이는 본 발명을 구체적으로 설명하기 위한 것

으로, 본 발명은 이에 한정되지 않으며, 본 발명의 기술적 사상 내에서 당 분야의 통상의 지식을 가진 자에 의해 그 변형이나 개량이 가능함이 명백하다.

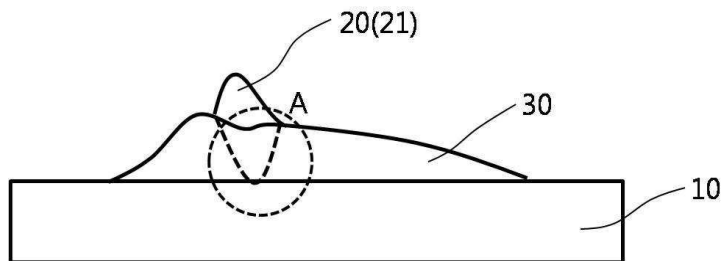
[0163] 본 발명의 단순한 변형 내지 변경은 모두 본 발명의 영역에 속한 것으로 본 발명의 구체적인 보호 범위는 첨부된 특허청구범위에 의하여 명확해질 것이다.

부호의 설명

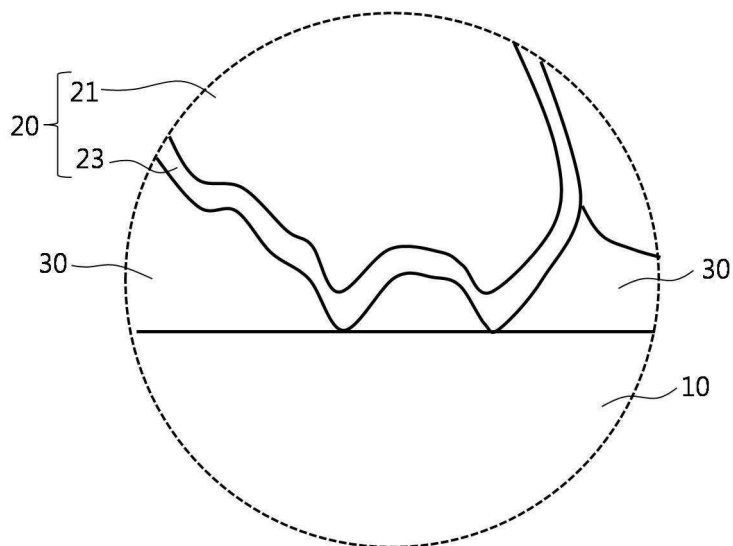
[0165] 10: 기재 20: 전도부
21: 액체금속 23: 산화물층
30: 접합부 31: 폴리머

도면

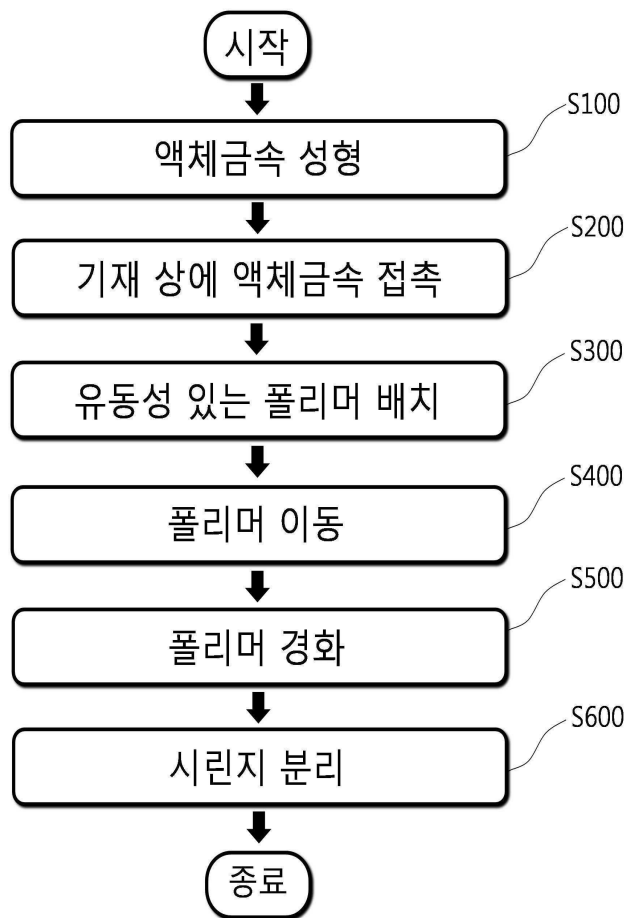
도면1



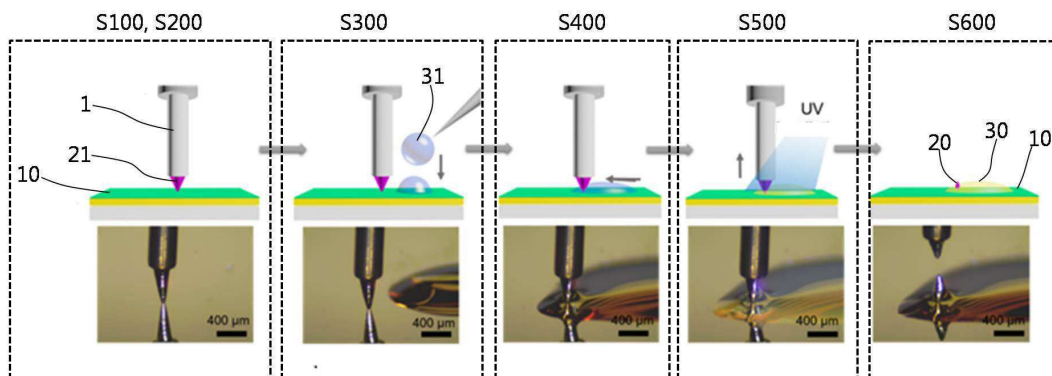
도면2



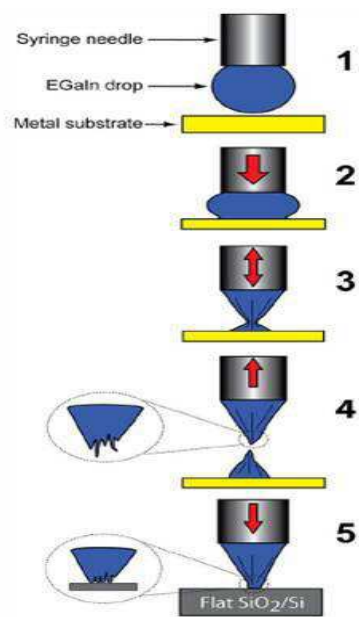
도면3



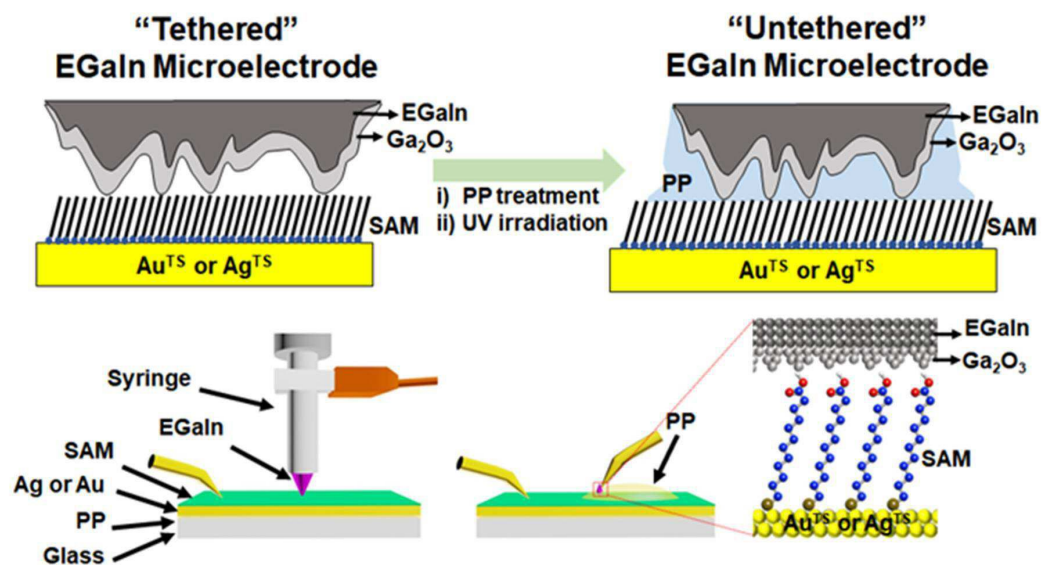
도면4



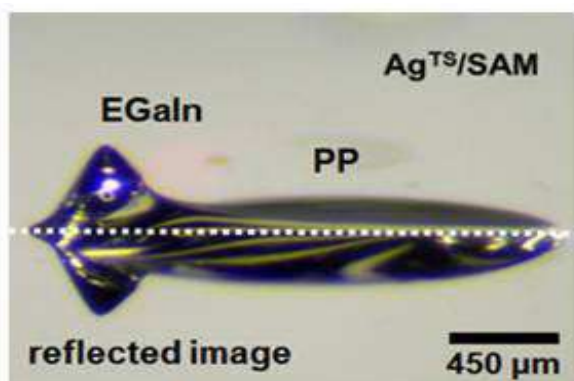
도면5



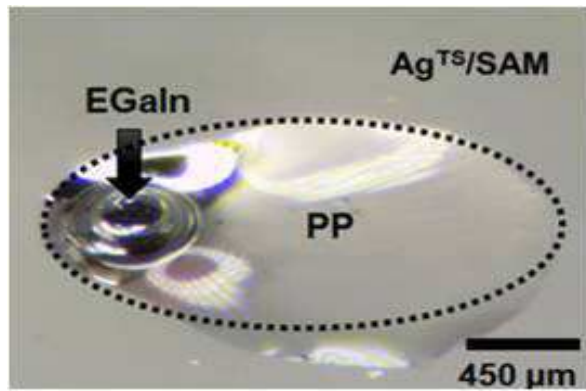
도면6



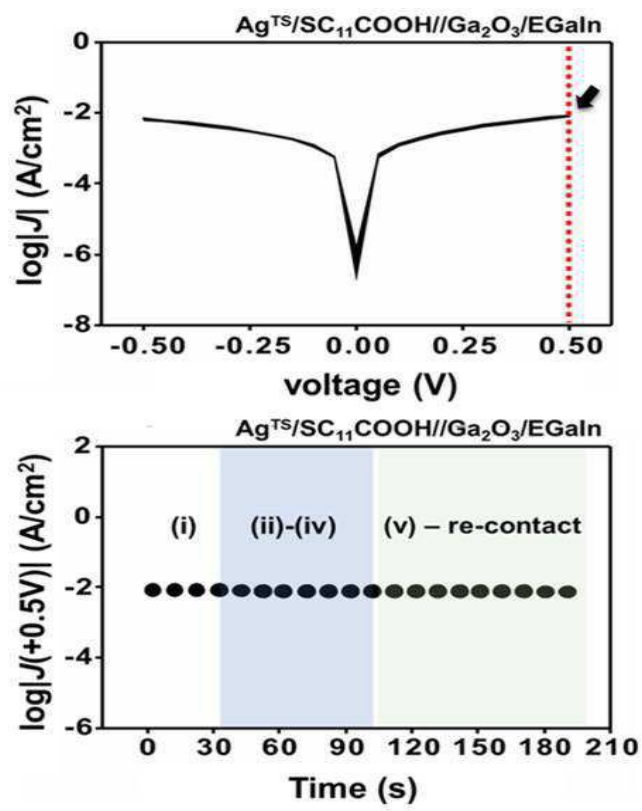
도면7



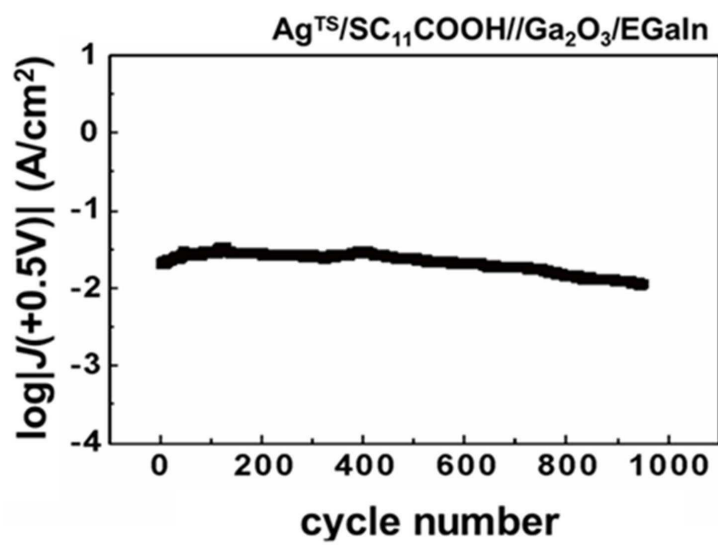
도면8



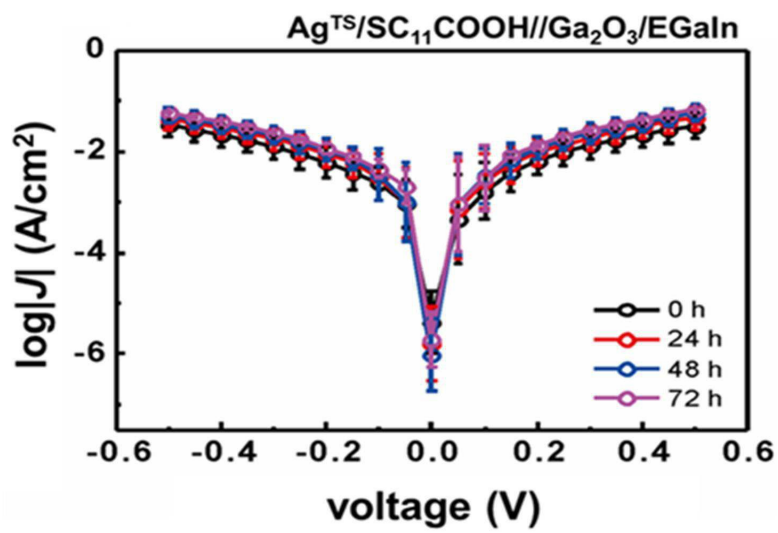
도면9



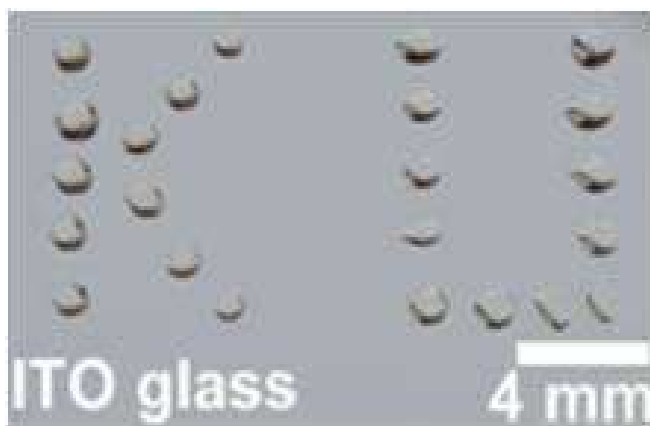
도면10



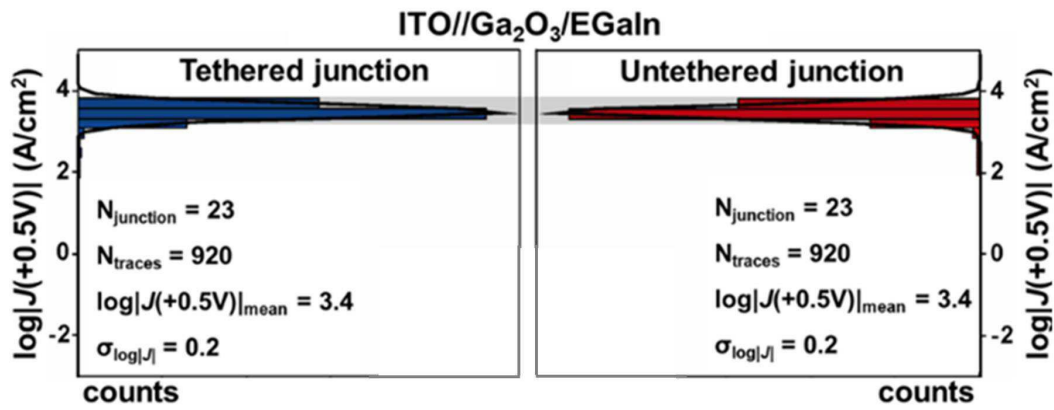
도면11



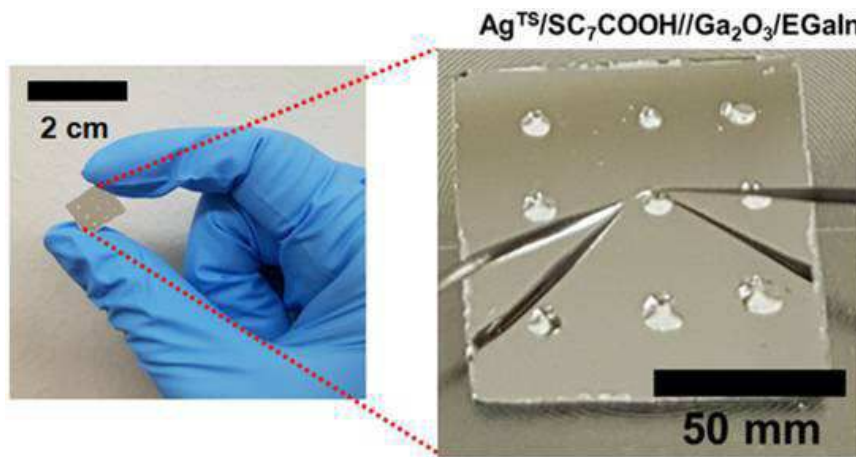
도면12



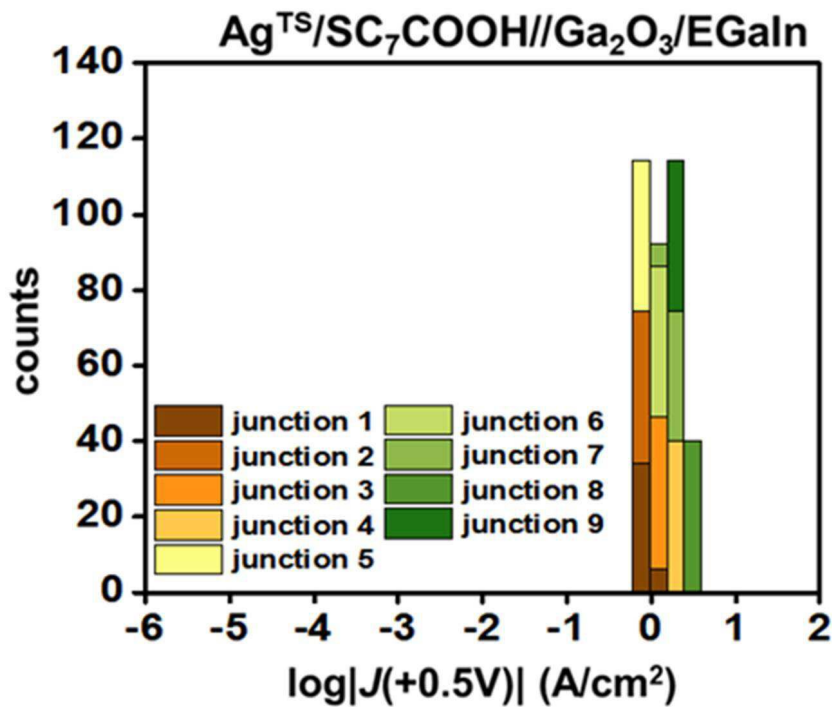
도면13



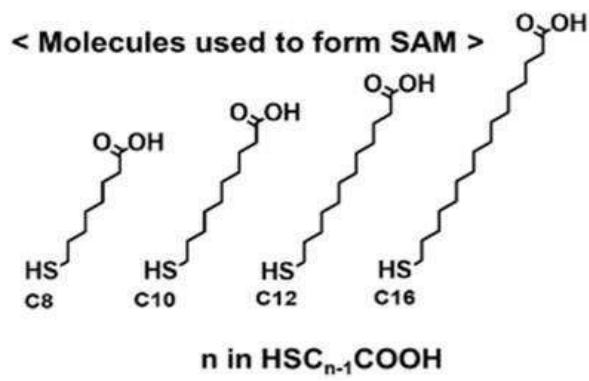
도면14



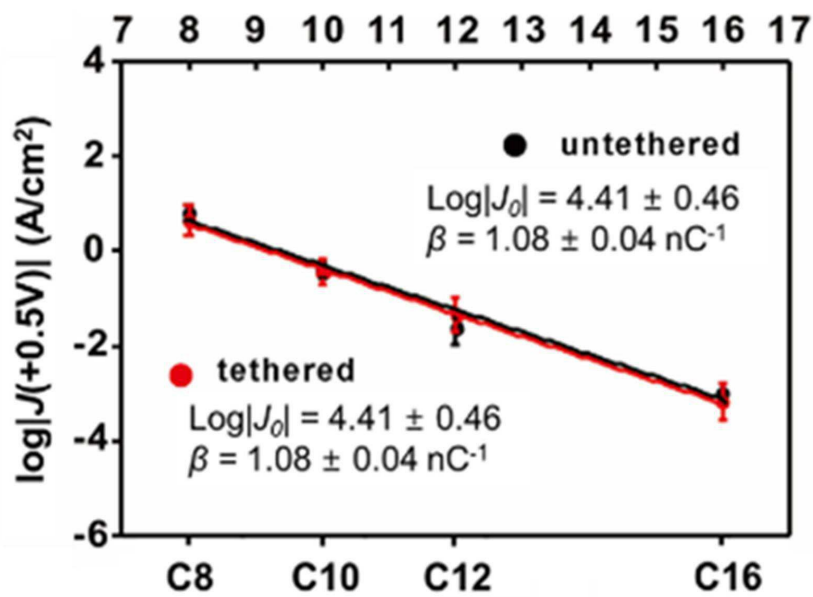
도면15



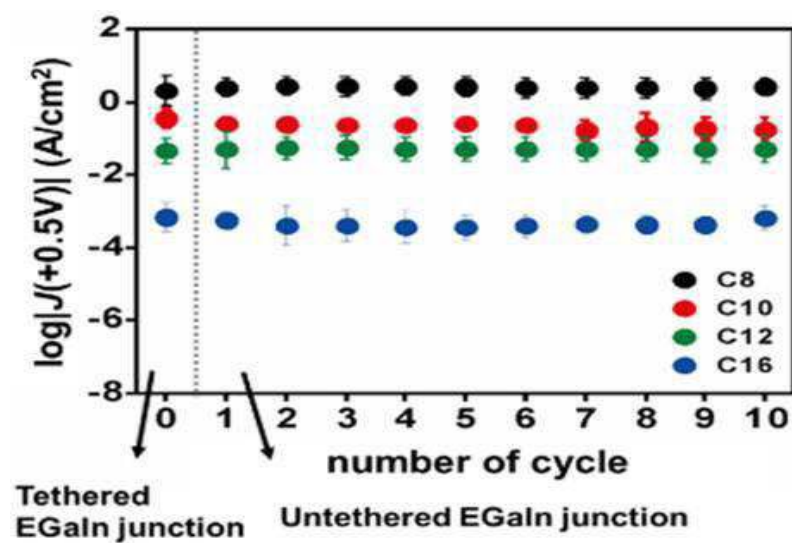
도면16



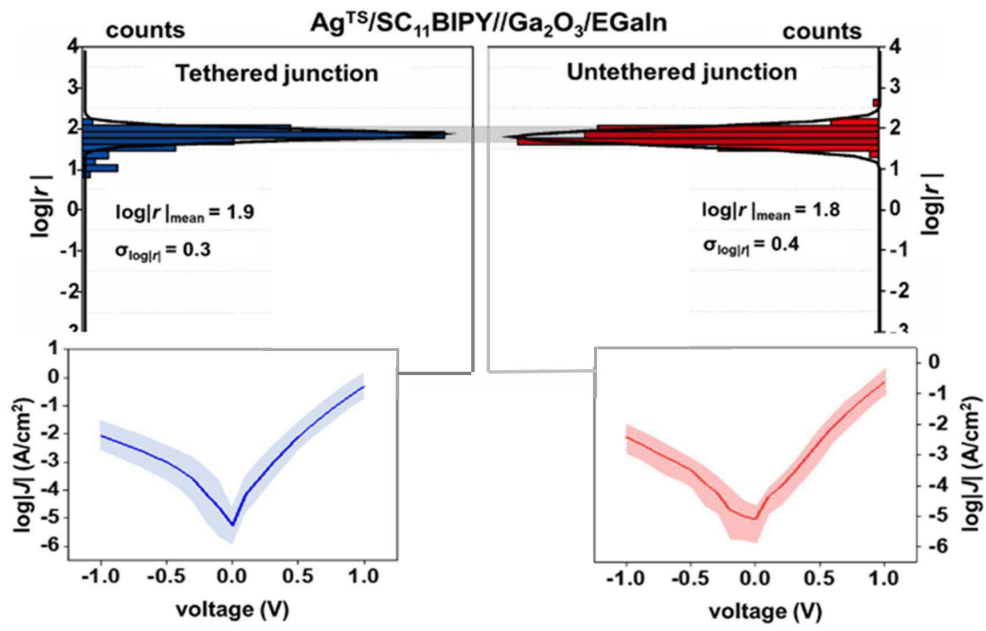
도면17



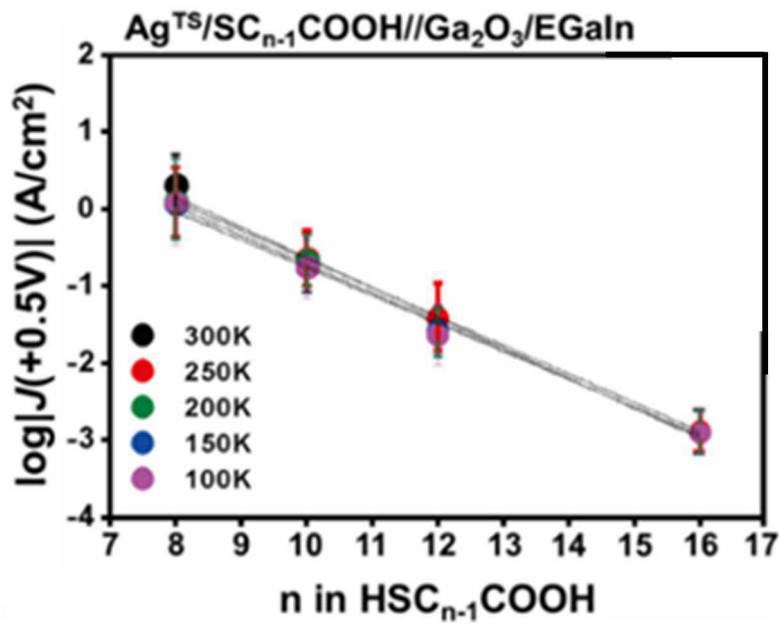
도면18



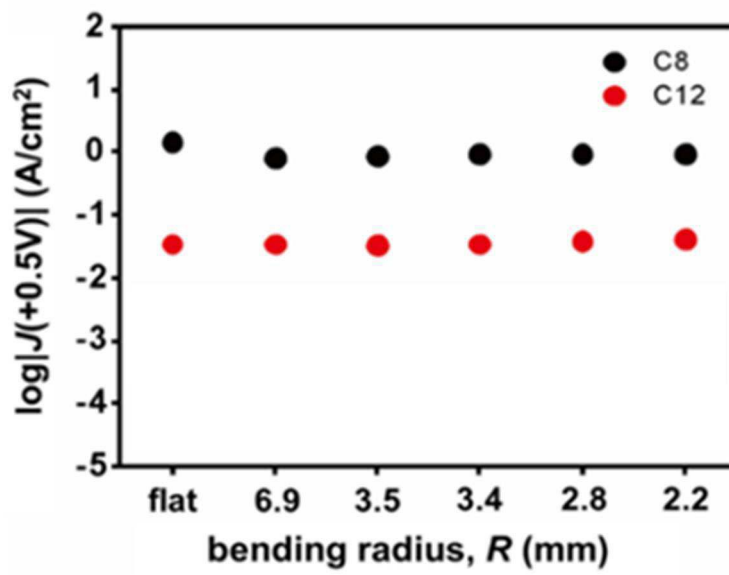
도면19



도면20



도면21



도면22

