



(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2022-0060233

(43) 공개일자 2022년05월11일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)

H01L 51/05 (2006.01) H01L 51/00 (2006.01)

H01L 51/10 (2006.01)

(52) CPC특허분류

H01L 51/0587 (2013.01)

H01L 51/005 (2013.01)

(21) 출원번호 10-2020-0145995

(22) 출원일자 2020년11월04일

심사청구일자 2020년11월04일

(71) 출원인

고려대학교 산학협력단

서울특별시 성북구 안암로 145, 고려대학교 (안암동5가)

(72) 발명자

신재호

서울특별시 강동구 성내로18길 34, 401호(성내동)

왕건욱

서울특별시 강북구 삼양로19길 25, 112동 1103호
(미아동, 삼성래미안트리베라1차아파트)

(74) 대리인

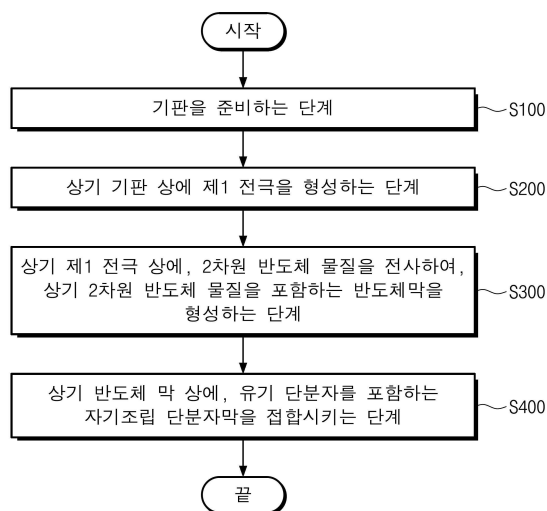
박상열, 최내윤

전체 청구항 수 : 총 10 항

(54) 발명의 명칭 이중접합 분자 다이오드 및 그 제조 방법

(57) 요약

이중접합 분자 다이오드가 제공된다. 상기 이중접합 분자 다이오드는, 제1 전극, 상기 제1 전극 상에 배치되고, 2차원 반도체 물질을 포함하는 반도체막, 상기 반도체막 상에 배치되고, 유기 단분자를 포함하는 자기조립 단분자막(Self-assembled monolayer, SAM), 및 상기 자기조립 단분자막 상에 배치되는 제2 전극을 포함할 수 있다.

대표도 - 도1

(52) CPC특허분류

H01L 51/0595 (2013.01)

H01L 51/102 (2013.01)

이 발명을 지원한 국가연구개발사업

과제고유번호	1711121294
과제번호	2020M3F3A2A03082825
부처명	과학기술정보통신부
과제관리(전문)기관명	한국연구재단
연구사업명	차세대지능형반도체기술개발
연구과제명	초저전력 및 고효율 학습 가능한 단 분자 스케일 분자-2D 이중접합 기반 인공 시냅스 소자 개발
기 여 율	1/1
과제수행기관명	고려대학교 KU-KIST 융합대학원
연구기간	2020.07.01 ~ 2020.12.31

명세서

청구범위

청구항 1

제1 전극;

상기 제1 전극 상에 배치되고, 2차원 반도체 물질을 포함하는 반도체막;

상기 반도체막 상에 배치되고, 유기 단분자를 포함하는 자기조립 단분자막(Self-assembled monolayer, SAM); 및

상기 자기조립 단분자막 상에 배치되는 제2 전극을 포함하되,

상기 유기 단분자의 길이, 상기 유기 단분자의 HOMO(Highest Occupied Molecular Orbital)-LUMO(Lowest Unoccupied Molecular Orbital) 갭 차이, 및 상기 반도체막의 두께에 따라 정류비가 제어되는 것을 포함하는 이중접합 분자 다이오드.

청구항 2

제1 항에 있어서,

상기 유기 단분자의 길이가 길수록, 상기 정류비가 증가하는 것을 포함하는 이중접합 분자 다이오드.

청구항 3

제1 항에 있어서,

상기 유기 단분자의 HOMO-LUMO 갭 차이가 작을수록, 상기 정류비가 증가하는 것을 포함하는 이중접합 분자 다이오드.

청구항 4

제1 항에 있어서,

상기 반도체막의 두께가 얇을수록, 상기 정류비가 증가하는 것을 포함하는 이중접합 분자 다이오드.

청구항 5

제1 항에 있어서,

상기 이중접합 분자 다이오드는, 1.83×10^4 이상의 정류비를 갖는 것을 포함하는 이중접합 분자 다이오드.

청구항 6

제1 항에 있어서,

상기 2차원 반도체 물질은, 전이금속 디칼코게나이드(transition metal dichalcogenides)를 포함하는 이중접합 분자 다이오드.

청구항 7

제6 항에 있어서,

상기 전이금속 디칼코게나이드는, 이황화몰리브덴(MoS_2) 또는 텅스텐 디셀레나이드(WSe_2) 중 어느 하나를 포함하는 이종접합 분자 다이오드.

청구항 8

제1 항에 있어서,

상기 유기 단분자는, 벤젠-1-모노티올(benzene-1-monothiol), 바이페닐-4-모노티올(biphenyl-4-monothiol), 1-옥테인모노티올(1-octanemonothiol), 1-데케인모노티올(1-decanemonothiol), 및 1-도디케인모노티올(dodecanemonothiol) 중 어느 하나를 포함하는 이종접합 분자 다이오드.

청구항 9

기판을 준비하는 단계;

상기 기판 상에 제1 전극을 형성하는 단계;

상기 제1 전극 상에, 2차원 반도체 물질을 전사하여, 상기 2차원 반도체 물질을 포함하는 반도체막을 형성하는 단계; 및

상기 반도체막 상에, 유기 단분자를 포함하는 자기조립 단분자막을 접합시키는 단계를 포함하되,

상기 유기 단분자의 길이, 상기 유기 단분자의 HOMO(Highest Occupied Molecular Orbital)-LUMO(Lowest Unoccupied Molecular Orbital) 갭 차이, 및 상기 반도체막의 두께에 따라 정류비가 제어되는 것을 포함하는 이종접합 분자 다이오드의 제조 방법.

청구항 10

제9 항에 있어서,

상기 반도체막 상에 상기 자기조립 단분자막을 접합시키는 단계는,

제2 전극에 상기 유기 단분자를 제공하여, 상기 제2 전극 상에 상기 자기조립 단분자막을 형성시키는 단계; 및

상기 자기조립 단분자막과 상기 반도체막이 접촉되도록, 상기 자기조립 단분자막이 형성된 상기 제2 전극과 상기 반도체막을 접합시키는 단계를 포함하는 이종접합 분자 다이오드의 제조 방법.

발명의 설명

기술 분야

- [0001] 본 발명은 이종접합 분자 다이오드 및 그 제조 방법에 관한 것으로서, 보다 구체적으로는 반도체 물질과 단분자가 접합되어 다이오드 특성을 나타내는 이종접합 분자 다이오드 및 그 제조 방법에 관련된 것이다.
- [0002] 본 발명은 아래의 연구개발과제를 지원받아 개발되었다.
- [0003] 세부과제번호 - R1827612
- [0004] 과제수행기관명 - 고려대학교 KU-KIST 융합대학원
- [0005] 과제관리(전문)기관명 - 재단법인 한국도레이과학진흥재단
- [0006] 연구사업명 - 연구지원
- [0007] 연구과제명 - 유기 단 분자 소재와 이차원 물질 접합을 활용한 신개념 하이브리드 기능성 전자소자 시스템 개발

- [0008] 과제수행기관명 - 고려대학교 KU-KIST 융합대학원
- [0009] 연구기간 - 2018-12-01 ~ 2021-11-30
- [0011] 과제고유번호 - 2V08560
- [0012] 세부과제번호 - R1828382
- [0013] 과제수행기관명 - 고려대학교 KU-KIST 융합대학원
- [0014] 과제관리(전문)기관명 - 한국과학기술연구원
- [0015] 연구사업명 - KU-KIST 스쿨 운영사업
- [0016] 연구과제명 - 초저전력 Non-Von Neumann 정보처리/저장 소자 시스템 개발
- [0017] 과제수행기관명 - 고려대학교 KU-KIST 융합대학원
- [0018] 연구기간 - 2020-01-01 ~ 2020-12-31

배경 기술

- [0019] 분자전자소자는 전자소자의 활성층을 단분자 혹은 단분자막을 이용한 소자로 기존의 실리콘 기반 소자의 고집적화에 따른 양자 간섭효과 문제, 터널링 현상, 불안정한 도핑, 과열 현상 등을 해결할 수 있는 소자 중 하나로 주목을 받아왔다. 분자전자소자는 단분자 (길이 = 1-2nm)를 활성층으로 사용한다는 점에서 초고집적, 초저전력, 적은 발열 등의 장점을 가지고 있지만, 다이오드, 트랜지스터, 메모리와 같은 기능성 전자소자를 위해서는 특정 분자를 합성해야 된다는 문제점을 가지고 있다.
- [0020] 특히, 분자-스케일 다이오드를 구현하기 위해서는 도너-시그마결합-억셉터 (D- σ -A) 형태의 분자 또는 페로센 단위체가 있는 포화탄화수소 기반의 분자를 합성하여 분자 다이오드를 구현해왔다. 도너-시그마결합-억셉터 형태 분자의 경우, 도너 단위체에 있는 분자 오비탈 에너지 준위와 억셉터 단위체에 있는 분자 오비탈 에너지 준위가 비대칭적으로 존재하여, 전압의 극성에 따라 전하가 느끼는 터널링 장벽이 달라져 정류 특성이 나오게 된다. 또한, 페로센 단위체가 있는 포화탄화수소 기반 분자의 경우, 전압 인가 방향에 따라 인가 전압 범위 내에 페로센 단위체에 존재하는 분자 오비탈 에너지 준위의 존재 유무에 따라 터널링 길이에 변화에 따라 정류 특성이 생기게 된다. 이러한 방법은 분자-스케일에서 $10^2 \sim 10^5$ 의 정류비를 가진다는 큰 장점과 낮은 전압 (1 V 내외)에서 구동한다는 큰 장점이 있다. 하지만, 제한된 소자 플랫폼에서만 구동된다는 큰 단점과 다이오드를 위한 특정 분자를 합성해야하는 어려움을 가지고 있다.

발명의 내용

해결하려는 과제

- [0021] 본 발명이 해결하고자 하는 일 기술적 과제는, 특정 분자의 합성 없이 분자 스케일의 다이오드가 구현 가능한 이중접합 분자 다이오드 및 그 제조 방법을 제공하는 데 있다.
- [0022] 본 발명이 해결하고자 하는 다른 기술적 과제는, 다양한 소자 플랫폼에서 구현 가능한 이중접합 분자 다이오드 및 그 제조 방법을 제공하는 데 있다.
- [0023] 본 발명이 해결하고자 하는 또 다른 기술적 과제는, 정류비가 향상된 이중접합 분자 다이오드 및 그 제조 방법을 제공하는 데 있다.
- [0024] 본 발명이 해결하고자 하는 또 다른 기술적 과제는, 다이오드 특성을 용이하게 제어 가능한 이중접합 분자 다이오드 및 그 제조 방법을 제공하는 데 있다.
- [0025] 본 발명이 해결하고자 하는 또 다른 기술적 과제는, 정류 특성의 변화 예측이 용이한 이중접합 분자 다이오드 및 그 제조 방법을 제공하는 데 있다.
- [0026] 본 발명이 해결하고자 하는 기술적 과제는 상술된 것에 제한되지 않는다.

과제의 해결 수단

- [0027] 상기 기술적 과제를 해결하기 위해, 본 발명은 이중접합 분자 다이오드를 제공한다.
- [0028] 일 실시 예에 따르면, 상기 이중접합 분자 다이오드는, 제1 전극, 상기 제1 전극 상에 배치되고, 2차원 반도체 물질을 포함하는 반도체막, 상기 반도체막 상에 배치되고, 유기 단분자를 포함하는 자기조립 단분자막(Self-assembled monolayer, SAM), 및 상기 자기조립 단분자막 상에 배치되는 제2 전극을 포함하되, 상기 유기 단분자의 길이, 상기 유기 단분자의 HOMO(Highest Occupied Molecular Orbital)-LUMO(Lowest Unoccupied Molecular Orbital) 갭 차이, 및 상기 반도체막의 두께에 따라 정류비가 제어되는 것을 포함할 수 있다.
- [0029] 일 실시 예에 따르면, 상기 이중접합 분자 다이오드는, 상기 유기 단분자의 길이가 길수록, 상기 정류비가 증가하는 것을 포함할 수 있다.
- [0030] 일 실시 예에 따르면, 상기 이중접합 분자 다이오드는, 상기 유기 단분자의 HOMO-LUMO 갭 차이가 작을수록, 상기 정류비가 증가하는 것을 포함할 수 있다.
- [0031] 일 실시 예에 따르면, 상기 이중접합 분자 다이오드는, 상기 반도체막의 두께가 얇을수록, 상기 정류비가 증가하는 것을 포함할 수 있다.
- [0032] 일 실시 예에 따르면, 상기 이중접합 분자 다이오드는, 1.83×10^4 이상의 정류비를 갖는 것을 포함할 수 있다.
- [0033] 일 실시 예에 따르면, 상기 2차원 반도체 물질은, 전이금속 디칼코게나이드(transition metal dichalcogenides)를 포함할 수 있다.
- [0034] 일 실시 예에 따르면, 상기 전이금속 디칼코게나이드는, 이황화몰리브덴(MoS_2) 또는 텅스텐 디셀레나이드(WSe_2) 중 어느 하나를 포함할 수 있다.
- [0035] 일 실시 예에 따르면, 상기 유기 단분자는, 벤젠-1-모노티올(benzene-1-monothiol), 바이페닐-4-모노티올(biphenyl-4-monothiol), 1-옥테인모노티올(1-octanemonothiol), 1-데케인모노티올(1-decanemonothiol), 및 1-도다케인모노티올(dodecanemonothiol) 중 어느 하나를 포함할 수 있다.
- [0037] 상기 기술적 과제를 해결하기 위해, 본 발명은 이중접합 분자 다이오드의 제조 방법을 제공한다.
- [0038] 일 실시 예에 따르면, 상기 이중접합 분자 다이오드의 제조 방법은, 기판을 준비하는 단계, 상기 기판 상에 제1 전극을 형성하는 단계, 상기 제1 전극 상에, 2차원 반도체 물질을 전사하여, 상기 2차원 반도체 물질을 포함하는 반도체막을 형성하는 단계, 및 상기 반도체막 상에, 유기 단분자를 포함하는 자기조립 단분자막을 접합시키는 단계를 포함하되, 상기 유기 단분자의 길이, 상기 유기 단분자의 HOMO(Highest Occupied Molecular Orbital)-LUMO(Lowest Unoccupied Molecular Orbital) 갭 차이, 및 상기 반도체막의 두께에 따라 정류비가 제어되는 것을 포함할 수 있다.
- [0039] 일 실시 예에 따르면, 상기 반도체막 상에 상기 자기조립 단분자막을 접합시키는 단계는, 제2 전극에 상기 유기 단분자를 제공하여, 상기 제2 전극 상에 상기 자기조립 단분자막을 형성시키는 단계, 및 상기 자기조립 단분자막과 상기 반도체막이 접촉되도록, 상기 자기조립 단분자막이 형성된 상기 제2 전극과 상기 반도체막을 접합시키는 단계를 포함할 수 있다.

발명의 효과

- [0040] 본 발명의 실시 예에 따른 이중접합 분자 다이오드는, 제1 전극, 상기 제1 전극 상에 배치되고, 2차원 반도체 물질을 포함하는 반도체막, 상기 반도체막 상에 배치되고, 유기 단분자를 포함하는 자기조립 단분자막, 및 상기 자기조립 단분자막 상에 배치되는 제2 전극을 포함함으로써, 상기 2차원 반도체 물질과 상기 유기 단분자의 에너지 밴드 접합 특성에 의하여 다이오드 특성을 구현할 수 있다. 이에 따라, 다이오드를 위한 특정 분자의 합성이 요구되지 않으므로, 특정 소자 플랫폼이 아닌 다양한 소자 플랫폼에서 구현될 수 있는 장점이 있다.

도면의 간단한 설명

- [0041] 도 1은 본 발명의 실시 예에 따른 이중접합 분자 다이오드의 제조 방법을 설명하는 순서도이다.

도 2는 본 발명의 실시 예에 따른 이중접합 분자 다이오드의 모식도이다.

도 3 및 도 4는 본 발명의 실시 예 2 및 실시 예 6에 따른 이중접합 분자 다이오드가 포함하는 반도체막의 특성을 나타내는 사진 및 그래프이다.

도 5는 본 발명의 실시 예 및 비교 예들에 따른 다이오드의 전기적 특성을 비교하는 그래프이다.

도 6 및 도 7은 본 발명의 실시 예 2 및 실시 예 6에 따른 이중접합 분자 다이오드의 전기적 특성을 비교하는 그래프이다.

도 8은 본 발명의 실시 예에 따른 이중접합 분자 다이오드가 포함하는 반도체막의 두께 및 단분자의 종류에 따른 정류 특성을 비교하는 그래프이다.

도 9는 본 발명의 실시 예에 따른 이중접합 분자 다이오드가 포함하는 단분자의 길이 및 단분자의 HOMO-LUMO 갭 차이에 따른 정류 특성을 비교하는 그래프이다.

도 10은 본 발명의 실시 예들에 따른 이중접합 분자 다이오드의 전류밀도 및 정류비를 비교하는 그래프이다.

도 11은 본 발명의 실시 예들에 따른 이중접합 분자 다이오드의 전압 인가 방향에 따른 전하 수송 원리를 나타내는 도면이다.

도 12는 본 발명의 실시 예 2에 따른 이중접합 분자 다이오드의 단분자 길이, 단분자 HOMO-LUMO 갭 차이, 및 반도체막 두께에 따라 예측되는 정류비를 나타내는 모식도이다.

도 13 및 도 14는 본 발명의 실시 예에 따른 이중접합 분자 다이오드의 활용 예를 나타내는 도면이다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

- [0042] 이하, 첨부된 도면들을 참조하여 본 발명의 바람직한 실시 예를 상세히 설명할 것이다. 그러나 본 발명의 기술적 사상은 여기서 설명되는 실시 예에 한정되지 않고 다른 형태로 구체화 될 수도 있다. 오히려, 여기서 소개되는 실시 예는 개시된 내용이 철저하고 완전해질 수 있도록 그리고 당업자에게 본 발명의 사상이 충분히 전달될 수 있도록 하기 위해 제공되는 것이다.
- [0043] 본 명세서에서, 어떤 구성요소가 다른 구성요소 상에 있다고 언급되는 경우에 그것은 다른 구성요소 상에 직접 형성될 수 있거나 또는 그들 사이에 제 3의 구성요소가 개재될 수도 있다는 것을 의미한다. 또한, 도면들에 있어서, 막 및 영역들의 두께는 기술적 내용의 효과적인 설명을 위해 과장된 것이다.
- [0044] 또한, 본 명세서의 다양한 실시 예 들에서 제1, 제2, 제3 등의 용어가 다양한 구성요소들을 기술하기 위해서 사용되었지만, 이들 구성요소들이 이 같은 용어들에 의해서 한정되어서는 안 된다. 이들 용어들은 단지 어느 구성요소를 다른 구성요소와 구별시키기 위해서 사용되었을 뿐이다. 따라서, 어느 한 실시 예에 제 1 구성요소로 언급된 것이 다른 실시 예에서는 제 2 구성요소로 언급될 수도 있다. 여기에 설명되고 예시되는 각 실시 예는 그것의 상보적인 실시 예도 포함한다. 또한, 본 명세서에서 '및/또는'은 전후에 나열한 구성요소들 중 적어도 하나를 포함하는 의미로 사용되었다.
- [0045] 명세서에서 단수의 표현은 문맥상 명백하게 다르게 뜻하지 않는 한 복수의 표현을 포함한다. 또한, "포함하다" 또는 "가지다" 등의 용어는 명세서상에 기재된 특징, 숫자, 단계, 구성요소 또는 이들을 조합한 것이 존재함을 지정하려는 것이지, 하나 또는 그 이상의 다른 특징이나 숫자, 단계, 구성요소 또는 이들을 조합한 것들의 존재 또는 부가 가능성을 배제하는 것으로 이해되어서는 안 된다. 또한, 본 명세서에서 "연결"은 복수의 구성 요소를 간접적으로 연결하는 것, 및 직접적으로 연결하는 것을 모두 포함하는 의미로 사용된다.
- [0046] 또한, 하기에서 본 발명을 설명함에 있어 관련된 공지 기능 또는 구성에 대한 구체적인 설명이 본 발명의 요지를 불필요하게 흐릴 수 있다고 판단되는 경우에는 그 상세한 설명은 생략할 것이다.
- [0048] 도 1은 본 발명의 실시 예에 따른 이중접합 분자 다이오드의 제조 방법을 설명하는 순서도이고, 도 2는 본 발명의 실시 예에 따른 이중접합 분자 다이오드의 모식도이다.
- [0049] 도 1 및 도 2를 참조하면, 기판(미도시)이 준비된다(S100). 일 실시 예에 따르면, 상기 기판(미도시)은 반도체 기판일 수 있다. 예를 들어, 상기 기판(미도시)은 SiO₂/Si 기판일 수 있다.

- [0050] 상기 기판(미도시) 상에 제1 전극(100)이 형성될 수 있다(S200). 일 실시 예에 따르면, 상기 제1 전극(100)은 금속을 포함할 수 있다. 예를 들어, 상기 금속은 금(Au), 백금(Pt), 은(Ag), 및 구리(Cu) 중 어느 하나를 포함할 수 있다. 일 실시 예에 따르면, 상기 제1 전극(100)은 E-beam evaporator를 통해, 상기 기판(미도시) 상에 형성될 수 있다.
- [0051] 상기 제1 전극(100) 상에 반도체막(200)이 형성될 수 있다(S300). 일 실시 예에 따르면, 상기 반도체막(200)은 이차원 반도체 물질을 포함할 수 있다. 예를 들어, 상기 이차원 반도체 물질은 전이금속 디칼코게나이드(transition metal dichalcogenides)를 포함할 수 있다. 예를 들어, 상기 전이금속 디칼코게나이드는, n-타입의 이황화몰리브덴(MoS_2) 또는 p-타입의 텅스텐 디셀레나이드(WSe_2) 중 어느 하나를 포함할 수 있다.
- [0052] 일 실시 예에 따르면, 상기 반도체막(200)은, 상기 제1 전극(100) 상에 상기 이차원 반도체 물질을 전사하는 방법으로 형성될 수 있다. 예를 들어, 상기 이차원 반도체 물질은, 스탬프(stamp)를 이용하여 기계적으로 전사될 수 있다. 보다 구체적으로, 폴리-프로필렌 카보네이트(poly-propylene carbonate, PPC)/폴리디메틸 실록세인(polydimethyl siloxane, PDMS) 스탬프를 이용하여, n-타입의 이황화몰리브덴(MoS_2) 및 p-타입의 텅스텐 디셀레나이드(WSe_2) 중 어느 하나가 상기 제1 전극(100) 상에 기계적으로 전사됨으로써, 상기 반도체막(200)이 형성될 수 있다.
- [0053] 일 실시 예에 따르면, 상기 반도체막(200)은 단일막 구조를 가질 수 있다. 이와 달리, 다른 실시 예에 따르면, 상기 반도체막(200)은 복수의 단일막이 적층된 구조를 가질 수 있다. 예를 들어, 상기 반도체막(200)으로서 이황화몰리브덴(MoS_2)막이 사용되는 경우, 상기 반도체막(200)은, 이황화몰리브덴(MoS_2) 단일막 구조를 갖거나, 복수의 이황화몰리브덴(MoS_2)막이 적층된 구조를 가질 수 있다.
- [0054] 상기 반도체막(200) 상에 자기조립 단분자막(300)이 접합될 수 있다(S400). 일 실시 예에 따르면, 상기 자기조립 단분자막(300)은 유기 단분자를 포함할 수 있다. 예를 들어, 상기 유기 단분자는 벤젠-1-모노티올(benzene-1-monothiol), 바이페닐-4-모노티올(biphenyl-4-monothiol), 1-옥테인모노티올(1-octanemonothiol), 1-데케인모노티올(1-decanemonothiol), 및 1-도디테인모노티올(dodecanemonothiol) 중 어느 하나를 포함할 수 있다.
- [0055] 일 실시 예에 따르면, 상기 반도체막(200) 상에 상기 자기조립 단분자막(300)을 접합시키는 단계는, 제2 전극(400)에 상기 유기 단분자를 제공하여, 상기 제2 전극(400) 상에 상기 자기조립 단분자막(300)을 형성시키는 단계, 및 상기 자기조립 단분자막(300)과 상기 반도체막(200)이 접촉되도록, 상기 자기조립 단분자막(300)이 형성된 상기 제2 전극(400)과 상기 반도체막(200)을 접합시키는 단계를 포함할 수 있다. 예를 들어, 상기 제2 전극(400)은 금속을 포함하는 원자힘 현미경(Atomic Force Microscope, AFM)의 팁(tip)일 수 있다. 예를 들어, 상기 금속은, 금(Au), 백금(Pt), 은(Ag), 및 구리(Cu) 중 어느 하나를 포함할 수 있다.
- [0056] 보다 구체적으로, 금(Au)을 포함하는 원자힘 현미경의 팁을 상기 유기 단분자가 에탄올과 혼합된 용액에 담귀, 상기 원자힘 현미경 팁에 상기 자기조립 단분자막(300)을 형성할 수 있다. 상기 자기조립 단분자막(300)의 형성 공정은, 질소가 채워진 글로브 박스에서 수행될 수 있다. 이에 따라, 상기 자기조립 단분자막의 산화가 방지될 수 있다. 이후, 상기 자기조립 단분자막(300)과 상기 반도체막(200)이 접촉되도록, 상기 원자힘 현미경 팁을 상기 반도체막(200)과 접합시킬 수 있다. 이에 따라, 상기 반도체막(200)과 상기 자기조립 단분자막(300)이 접합될 수 있다. 이 경우, 상기 원자힘 현미경 팁은, 상기 제2 전극(400)으로서 사용될 수 있다.
- [0057] 상기 이차원 반도체 물질을 포함하는 상기 반도체막(200)과 상기 유기 단분자를 포함하는 상기 자기조립 단분자막(300)이 접합되는 경우, 상기 이차원 반도체 물질과 상기 유기 단분자의 에너지 밴드 접합 특성에 의하여, 분자 스케일(예를 들어, 1~2 nm)의 다이오드가 구현될 수 있다.
- [0058] 상술된 바와 같이, 상기 이차원 반도체 물질과 상기 유기 단분자의 에너지 밴드 접합 특성에 의하여 다이오드가 구현되므로, 상기 실시 예에 따른 이중접합 분자 다이오드는, 상기 유기 단분자의 길이, 상기 유기 단분자의 HOMO(Highest Occupied Molecular Orbital)-LUMO(Lowest Unoccupied Molecular Orbital) 갭 차이, 및 상기 반도체막(200)의 두께에 따라 정류비(rectification ration)가 제어될 수 있다.
- [0059] 일 실시 예에 따르면, 상기 이중접합 분자 다이오드는, 상기 유기 단분자의 길이가 길수록 상기 정류비가 증가할 수 있다. 예를 들어, 상기 유기 단분자로서 상대적으로 길이가 긴 1-도디테인모노티올(dodecanemonothiol)이 사용된 상기 이중접합 분자 다이오드는, 상기 유기 단분자로서 상대적으로 길이가 짧은 1-옥테인모노티올(1-octanemonothiol)이 사용된 상기 이중접합 분자 다이오드 보다 정류비가 클 수 있다.

- [0060] 보다 구체적으로, 상기 자기조립 단분자막(300)이 상기 반도체막(200)과 상기 제2 전극(400) 사이에 배치되는 경우, 금속과 반도체 물질 사이에 발생하는 금속 유도 갭 상태(metal-induced gap state)가 감소되어, 상기 이중접합 분자 다이오드의 정류비가 증가할 수 있다. 이 경우, 상기 자기조립 단분자막(300)이 포함하는 상기 유기 단분자의 길이가 길수록, 상기 금속 유도 갭 상태의 감소 효과가 증가할 수 있다. 이에 따라, 상기 이중접합 분자 다이오드의 정류비가 보다 증가할 수 있다.
- [0061] 또한, 일 실시 예에 따르면, 상기 이중접합 분자 다이오드는, 상기 유기 단분자의 HOMO-LUMO 갭 차이가 작을수록 상기 정류비가 증가할 수 있다. 예를 들어, 상기 유기 단분자로서 길이가 비슷한 바이페닐-4-모노티올(biphenyl-4-monothiol) 또는 1-옥테인모노티올(1-octanemonothiol)이 사용되는 경우, HOMO-LUMO 갭 차이가 상대적으로 작은 바이페닐-4-모노티올(biphenyl-4-monothiol)이 사용된 상기 이중접합 다이오드의 정류비가, HOMO-LUMO 갭 차이가 상대적으로 큰 1-디케인모노티올(1-decanemonothiol)이 사용된 상기 이중접합 다이오드의 정류비보다 클 수 있다.
- [0062] 또한, 일 실시 예에 따르면, 상기 이중접합 분자 다이오드는, 상기 반도체막(200)의 두께가 얇을수록 상기 정류비가 증가할 수 있다. 예를 들어, 상기 반도체막(200)으로서 이황화몰리브덴(MoS_2)막이 사용되는 경우, 이황화몰리브덴(MoS_2) 단일막 구조를 갖는 상기 이중접합 다이오드의 정류비가, 복수의 이황화몰리브덴(MoS_2)막이 적층된 구조를 갖는 상기 이중접합 다이오드의 정류비보다 클 수 있다.
- [0063] 즉, 본 발명의 실시 예에 따른 이중접합 분자 다이오드는, 상기 유기 단분자의 길이, 상기 유기 단분자의 HOMO-LUMO 갭 차이, 및 상기 반도체막(200)의 두께를 제어함으로써 정류비를 1.24에서 1.83×10^4 까지 효율적으로 제어할 수 있다. 특히, 상기 이중접합 분자 다이오드는, 상기 유기 단분자의 길이가 길고, 상기 유기 단분자의 HOMO-LUMO 갭 차이가 작으며, 상기 반도체막(200)의 두께를 얇게 제어함으로써, 정류비를 증가시킬 수 있다. 구체적으로, 상기 실시 예에 따른 이중접합 분자 다이오드는, 상기 유기 단분자로서 길이가 길고 HOMO-LUMO 갭 차이가 작은 바이페닐-4-모노티올(biphenyl-4-monothiol)을 사용하고, 상기 반도체막(200)으로서 이황화몰리브덴(MoS_2) 단일막을 사용함으로써, 1.83×10^4 이상의 높은 정류비를 가질 수 있다.
- [0064] 종래의 분자 스케일 다이오드의 경우, 다이오드를 위한 특정 분자를 합성해야 함으로, 제한된 소자 플랫폼에서만 구동되는 한계점이 있었다. 하지만, 본 발명의 실시 예에 따른 이중접합 분자 다이오드는, 상기 제1 전극(100), 상기 제1 전극(100) 상에 배치되고, 2차원 반도체 물질을 포함하는 상기 반도체막(200), 상기 반도체막(200) 상에 배치되고, 유기 단분자를 포함하는 상기 자기조립 단분자막(300), 및 상기 자기조립 단분자막(300) 상에 배치되는 상기 제2 전극(400)을 포함함으로써, 상기 2차원 반도체 물질과 상기 유기 단분자의 에너지 밴드 결합 특성에 의하여 다이오드 특성을 구현할 수 있다. 이에 따라, 다이오드를 위한 특정 분자의 합성이 요구되지 않으므로, 특정 소자 플랫폼이 아닌 다양한 소자 플랫폼에서 구현될 수 있는 장점이 있다.
- [0066] 이상, 본 발명의 실시 예에 따른 이중접합 분자 다이오드 및 그 제조 방법이 설명되었다. 이하, 본 발명의 실시 예에 따른 이중접합 분자 다이오드 및 그 제조 방법의 구체적인 실험 예 및 특성 평가 결과가 설명된다.
- [0067] 실시 예 1에 따른 이중접합 분자 다이오드 제조
- [0068] SiO_2/Si 기판 상에 E-beam evaporator를 통해 금(Au) 전극을 형성시켰다. 이후, 상기 금(Au) 전극에 폴리-프로필렌 카보네이트(poly-propylene carbonate, PPC)/폴리디메틸 실록세인(polydimethyl siloxane, PDMS) 스탬프를 이용하여, 이황화몰리브덴(MoS_2)을 기계적으로 전사하여 반도체막을 형성하였다.
- [0069] 이후, 크롬(Cr)/금(Au)이 코팅된 원자힘 현미경 팁을 유기 단분자와 에탄올이 혼합된 용액에 담궈, 원자힘 현미경 팁에 자기조립 단분자막을 형성하였다. 자기조립 단분자막 형성 공정은, 질소가 채워진 글로브 박에서 수행되었고, 유기 단분자로서, 벤젠-1-모노티올(benzene-1-monothiol, OPT1)이 사용되었다.
- [0070] 최종적으로, 자기조립 단분자막이 형성된 원자힘 현미경 팁을 상기 반도체막과 접촉시켜, 이황화몰리브덴(MoS_2)과 벤젠-1-모노티올(benzene-1-monothiol, OPT1)을 접합시킴으로써, 실시 예 1에 따른 이중접합 분자 다이오드를 제조하였다.

- [0072] 실시 예 2에 따른 이중접합 분자 다이오드 제조
- [0073] 상술된 실시 예 1에 따른 이중접합 분자 다이오드를 제조하되, 유기 단분자로서 바이페닐-4-모노티올(biphenyl-4-monothiol, OPT2)이 사용되었다.
- [0075] 실시 예 3에 따른 이중접합 분자 다이오드 제조
- [0076] 상술된 실시 예 1에 따른 이중접합 분자 다이오드를 제조하되, 유기 단분자로서 1-옥테인모노티올(1-octanemonothiol, C8)이 사용되었다.
- [0078] 실시 예 4에 따른 이중접합 분자 다이오드 제조
- [0079] 상술된 실시 예 1에 따른 이중접합 분자 다이오드를 제조하되, 유기 단분자로서 1-디케인모노티올(1-decanemonothiol, C10)이 사용되었다.
- [0081] 실시 예 5에 따른 이중접합 분자 다이오드 제조
- [0082] 상술된 실시 예 1에 따른 이중접합 분자 다이오드를 제조하되, 유기 단분자로서 1-도디테인모노티올(dodecanemonothiol, C12)이 사용되었다.
- [0084] 실시 예 6에 따른 이중접합 분자 다이오드 제조
- [0085] 상술된 실시 예 2에 따른 이중접합 분자 다이오드를 제조하되, 반도체막으로서 텅스텐 디셀레나이드(WSe₂)가 사용되었다.
- [0087] 비교 예 1에 따른 다이오드 준비
- [0088] 서로 이격된 금(Au) 전극 사이에, 이황화몰리브덴(MoS₂) 반도체막이 배치된 비교 예 1에 따른 다이오드를 준비하였다.
- [0090] 비교 예 2에 따른 다이오드 준비
- [0091] 서로 이격된 금(Au) 전극 사이에, 텅스텐 디셀레나이드(WSe₂) 반도체막이 배치된 비교 예 2에 따른 다이오드를 준비하였다.
- [0093] 비교 예 3에 따른 다이오드 준비
- [0094] 서로 이격된 금(Au) 전극 사이에, 바이페닐-4-모노티올(biphenyl-4-monothiol, OPT2) 자기조립 단분자막이 배치된 비교 예 3에 따른 다이오드를 준비하였다.
- [0096] 상술된 실시 예들 및 비교 예들에 따른 다이오드의 구조가 아래의 <표 1>을 통해 정리된다.

표 1

구분	반도체막	자기조립 단분자막
실시 예 1	MoS ₂	OPT1
실시 예 2	MoS ₂	OPT2
실시 예 3	MoS ₂	C8

실시 예 4	MoS ₂	C10
실시 예 5	MoS ₂	C12
실시 예 6	WSe ₂	OPT2
비교 예 1	MoS ₂	-
비교 예 2	WSe ₂	-
비교 예 3	-	OPT2

- [0098] 도 3 및 도 4는 본 발명의 실시 예 2 및 실시 예 6에 따른 이종접합 분자 다이오드가 포함하는 반도체막의 특성을 나타내는 사진 및 그래프이다.
- [0099] 도 3을 참조하면, 상기 실시 예 2에 따른 이종접합 분자 다이오드가 포함하는 반도체막(1_L-MoS₂, RedLine) 및 상기 실시 예 6에 따른 이종접합 분자 다이오드가 포함하는 반도체막(1_L-WSe₂, BlueLine)에 대해, 광학 이미지 및 Topological line profile을 나타내었다.
- [0100] 도 3에서 확인할 수 있듯이, 상기 실시 예 2 및 실시 예 6에 따른 이종접합 분자 다이오드가 포함하는 반도체막은, 약 0.7 nm의 높이를 나타내었으며, 이로 인해 반도체막이 단일막 구조를 갖는 것을 알 수 있었다.
- [0101] 도 4를 참조하면, 상기 실시 예 2에 따른 이종접합 분자 다이오드가 포함하는 반도체막(1_L-MoS₂, RedLine) 및 상기 실시 예 6에 따른 이종접합 분자 다이오드가 포함하는 반도체막(1_L-WSe₂, BlueLine)에 대한 Raman spectra를 나타내었다.
- [0102] 도 4에서 확인할 수 있듯이, 상기 실시 예 2에 따른 이종접합 분자 다이오드가 포함하는 반도체막은, E_{2g}¹ 및 A_{1g} 진동 모드가 383 cm⁻¹ 및 402 cm⁻¹에서 Δ=18.5 cm⁻¹의 간격으로 나타나는 것을 확인할 수 있었고, 상기 실시 예 6에 따른 이종접합 분자 다이오드가 포함하는 반도체막은, 247cm⁻¹의 스펙트럼 중첩이 나타나는 것을 확인할 수 있었다.
- [0103] 도 5는 본 발명의 실시 예 및 비교 예들에 따른 다이오드의 전기적 특성을 비교하는 그래프이다.
- [0104] 도 5를 참조하면, 상기 실시 예 2(1_L-MoS₂/OPT2, RedLine), 실시 예 6(1_L-WSe₂/OPT2, BlueLine), 비교 예 1(MoS₂ only), 비교 예 2(WSe₂ only), 및 비교 예 3(OPT2 only)에 따른 다이오드를 준비한 후, 각각에 대해 전류-전압(I-V) 특성을 나타내었다.
- [0105] 도 5에서 확인할 수 있듯이, 상기 비교 예 1(MoS₂ only), 비교 예 2(WSe₂ only), 및 비교 예 3(OPT2 only)에 따른 다이오드의 경우, 금(Au) 전극의 페르미 레벨(E_F) 사이에 위치한 단일 전송 장벽으로 인하여, I-V 특성이 대칭적으로 나타나는 것을 확인할 수 있었다.
- [0106] 하지만, 상기 실시 예 2(1_L-MoS₂/OPT2, RedLine), 실시 예 6(1_L-WSe₂/OPT2, BlueLine)에 따른 이종접합 분자 다이오드의 경우, I-V 특성이 비대칭적으로 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 특히, 상기 실시 예 2에 따른 이종접합 분자 다이오드는, 실시 예 6에 따른 이종접합 분자 다이오드와 비교하여 V<0에서 I가 더 낮고, V>0에서 I가 더 높게 나타나 비대칭성이 더욱 크게 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 또한, 상기 실시 예 2(1_L-MoS₂/OPT2, RedLine)에 따른 이종접합 분자 다이오드의 정류비(RR)는 1.79 x 10³으로서, 상기 실시 예 6(1_L-WSe₂/OPT2, BlueLine)에 따른 이종접합 분자 다이오드의 정류비(RR) 2.31 보다 현저하게 높게 나타나는 것을 확인할 수 있었다.
- [0107] 도 6 및 도 7은 본 발명의 실시 예 2 및 실시 예 6에 따른 이종접합 분자 다이오드의 전기적 특성을 비교하는 그래프이다.
- [0108] 도 6 및 도 7을 참조하면, 상기 실시 예 2(1_L-MoS₂/OPT2) 및 실시 예 6(1_L-WSe₂/OPT2)에 따른 이종접합 분자 다이오드 각각에 대해 복수개의 샘플을 준비한 후, 준비된 복수개의 샘플의 서로 다른 위치에서 I-V 특성을 측정

(200-1100회 측정)하여 나타내었다.

- [0109] 도 6에서 확인할 수 있듯이, 상기 실시 예 2 및 실시 예 6에 따른 이중접합 분자 다이오드는, 정류 동작이 재현 가능하게 획득되는 것을 확인할 수 있었다.
- [0110] 도 7에서 확인할 수 있듯이, 상기 실시 예 2에 따른 이중접합 분자 다이오드의 정류비는 약 $(1.38 \pm 0.73) \times 10^3$ 으로서, 상기 실시 예 6에 따른 이중접합 분자 다이오드의 정류비 약 2.46 ± 1.42 보다 현저하게 높게 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 특히, 상기 실시 예 2에 따른 이중접합 분자 다이오드의 경우, 최대 1.83×10^4 이상의 높은 정류비를 갖는 것을 알 수 있었다.
- [0111] 도 5 내지 도 7을 통해 알 수 있듯이, 본 발명의 실시 예에 따른 이중접합 분자 다이오드는, 이차원 반도체 물질과 단분자가 접합됨으로써 다이오드의 특성이 나타날 뿐만 아니라, 높은 정류비를 갖는 것을 확인할 수 있었다. 또한, 본 발명의 실시 예에 따른 이중접합 분자 다이오드의 정류비를 향상시킴에 있어, 이차원 반도체 물질로서 n-타입의 이황화몰리브덴(MoS_2)을 사용하는 것이, p-타입의 텅스텐 디셀레나이드(WSe_2)를 사용하는 것보다 효과적임을 알 수 있다.
- [0112] 도 8은 본 발명의 실시 예에 따른 이중접합 분자 다이오드가 포함하는 반도체막의 두께 및 단분자의 종류에 따른 정류 특성을 비교하는 그래프이다.
- [0113] 도 8을 참조하면, 상기 실시 예 2($\text{N}_L\text{-MoS}_2/\text{OPT2}$) 및 실시 예 5($\text{N}_L\text{-MoS}_2/\text{C12}$)에 따른 이중접합 분자 다이오드를 준비하되, 각각의 이중접합 분자 다이오드가 포함하는 반도체막의 두께가 다른 복수의 샘플을 준비한 후, 준비된 복수의 샘플에 대해 I-V 특성을 측정하여 도 8의 (a)에 나타내었고, 정류비(RR)를 측정하여 도 8의 (b)에 나타내었다. 보다 구체적으로, 반도체막의 두께는 MoS_2 막의 적층수에 따라, 1_L-MoS_2 (단일막), 2_L-MoS_2 (단일막 2개 적층), 3_L-MoS_2 (단일막 3개 적층)로 구분되었고, 단일막의 적층수가 많을수록 반도체막의 두께가 두꺼움을 나타낸다.
- [0114] 도 8의 (a)에서 확인할 수 있듯이, 상기 실시 예 2에 따른 이중접합 분자 다이오드의 전류(I) 값은, 상기 실시 예 5에 따른 이중접합 분자 다이오드의 전류(I) 값보다 약 3배 높게 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 또한, 순방향 바이어스(+ 전압) 영역에서는, 반도체막의 두께와 관계없이 전류(I)값이 실질적으로 일정하게 나타나지만, 역방향 바이어스(- 전압) 영역에서는, 반도체막의 두께가 증가할수록 전류(I)값이 증가하는 것을 확인할 수 있었다.
- [0115] 도 8의 (b)에서 확인할 수 있듯이, 상기 실시 예 2 및 실시 예 5에 따른 이중접합 분자 다이오드 모두, 반도체막의 두께가 증가할수록 정류비(RR)가 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 이에 따라, 본 발명의 실시 예에 따른 이중접합 분자 다이오드는, 반도체막의 두께를 얇게 제어할수록 정류비를 향상시킬 수 있음을 알 수 있다.
- [0116] 도 9는 본 발명의 실시 예에 따른 이중접합 분자 다이오드가 포함하는 단분자의 길이 및 단분자의 HOMO-LUMO 겹차이에 따른 정류 특성을 비교하는 그래프이다.
- [0117] 도 9를 참조하면, 상기 실시 예 1($1_L\text{-MoS}_2/\text{OPT1}$), 실시 예 2($1_L\text{-MoS}_2/\text{OPT2}$), 실시 예 3($1_L\text{-MoS}_2/\text{C8}$), 실시 예 4($1_L\text{-MoS}_2/\text{C10}$), 및 실시 예 10($1_L\text{-MoS}_2/\text{C12}$)에 따른 이중접합 분자 다이오드를 준비한 후, 각각에 대해 I-V 특성을 측정하여 도 9의 (a)에 나타내었고, 정류비(RR)를 측정하여 도 9의 (b)에 나타내었다.
- [0118] 도 9의 (a)에서 확인할 수 있듯이, 상기 실시 예 2에 따른 이중접합 분자 다이오드는 상기 실시 예 1에 따른 이중접합 분자 다이오드와 비교하여, (+) 전압 영역보다 (-) 전압 영역에서 전류값이 더 많이 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 또한, 상기 실시 예 3 내지 실시 예 5에 따른 이중접합 분자 다이오드를 비교하는 경우, 실시 예 5, 실시 예 4, 및 실시 예 3의 순서로, (+) 전압 영역보다 (-) 전압 영역에서 전류값이 더 많이 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 즉, 분자의 길이가 길어질수록 (+) 전압 영역보다 (-) 전압 영역에서 전류값이 더 많이 감소하는 것을 확인할 수 있었다.
- [0119] 도 9의 (b)에서 확인할 수 있듯이, 상기 실시 예 1에 따른 이중접합 분자 다이오드와 비교하여 상기 실시 예 2에 따른 이중접합 분자 다이오드의 정류비가 높게 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 또한, 상기 실시 예 3 내지 실시 예 5에 따른 이중접합 분자 다이오드를 비교하는 경우, 실시 예 5, 실시 예 4, 및 실시 예 3의 순서로 정류비가 높게 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 즉, 분자의 길이가 길어질수록 다이오드의 정류비가 높게 나타나는 것을 확인할 수 있었다.

[0120] 한편, 분자의 길이가 비슷한 실시 예 2에 따른 이중접합 분자 다이오드와 실시 예 3에 따른 이중접합 분자 다이오드를 비교하는 경우, 분자의 길이가 비슷함에도 불구하고, HOMO-LUMO 갭 차이가 상대적으로 작은 실시 예 2에 따른 이중접합 분자 다이오드의 정류비가 HOMO-LUMO 갭 차이가 상대적으로 큰 실시 예 3에 따른 이중접합 분자 다이오드의 정류비보다 현저하게 높게 나타나는 것을 확인할 수 있었다.

[0121] 이에 따라, 본 발명의 실시 예에 따른 이중접합 분자 다이오드는, 단분자의 길이를 길게 제어할수록, 그리고 단분자의 HOMO-LUMO 갭 차이를 작게 제어할수록 정류비를 향상시킬 수 있음을 알 수 있다.

[0122] 도 10은 본 발명의 실시 예들에 따른 이중접합 분자 다이오드의 전류밀도 및 정류비를 비교하는 그래프이고, 도 11은 본 발명의 실시 예들에 따른 이중접합 분자 다이오드의 전압 인가 방향에 따른 전하 수송 원리를 나타내는 도면이다.

[0123] 도 10의 (a)를 참조하면, 상기 실시 예 1(OPT1), 실시 예 2(OPT2), 실시 예 3(C8), 실시 예 4(C10), 및 실시 예 5(C12)에 따른 이중접합 분자 다이오드 각각에 대해, 전압에 따른 전류밀도를 나타내는 J-V 특성을 나타내었고, 도 10의 (b)를 참조하면, 반도체막의 두께가 제어된($1_L \sim 3_L$) 상기 실시 예 1 내지 실시 예 5에 따른 이중접합 분자 다이오드의 정류비를 나타내었다.

[0124] 도 11에 도시된 바와 같이, (+) 전압 영역의 경우, 이차원 반도체 물질(예를 들어, MoS_2)의 전도대(Conduction band)가 인가 전압 사이에 존재하여, 전하가 단분자의 터널링 장벽만 느끼면서 진행하게 된다. 이에 따라, 단분자의 길이 및 단분자의 HOMO-LUMO 갭 차이만 고려하여 전류밀도(J) 및 정류비(RR)가 계산된다. 반면, (-) 전압 영역의 경우, 이차원 반도체 물질의 전도대가 인가 전압 사이에 존재하지 않으므로, 단분자의 길이, 단분자의 HOMO-LUMO 갭 차이뿐만 아니라, 반도체막의 두께까지 고려하여 전류밀도(J) 및 정류비(RR)가 계산된다.

[0125] 전류밀도(J)는 아래의 <수학식 1>, <수학식 2>, 및 <수학식 3>을 통해 계산되었다. <수학식 1>은 (+) 전압 영역(예를 들어, $V=+1.0\text{V}$)에서의 전류밀도(J) 계산을 나타내고, <수학식 2>는 (-) 전압 영역(예를 들어, $V=-1.0\text{V}$)에서의 전류밀도(J) 계산을 나타낸다.

[0126] <수학식 1>

$$J = \frac{q}{4\pi^2 \hbar d_{\text{tot}}^2} \left[\left(\Phi - \frac{qV}{2} \right) \exp \left(-\frac{2d_{\text{tot}} \sqrt{2m}}{\hbar} \sqrt{\Phi - \frac{qV}{2}} \right) - \left(\Phi + \frac{qV}{2} \right) \exp \left(-\frac{2d_{\text{tot}} \sqrt{2m}}{\hbar} \sqrt{\Phi + \frac{qV}{2}} \right) \right]$$

[0127] (d_{tot} : 단분자 길이, m : 캐리어 질량, Φ : 단분자 HOMO-LUMO 갭 차이)

[0130] <수학식 2>

$$J = A^* \cdot T \exp \left[-\frac{q}{k_B T} \left(\Phi_{\text{SB,eff}} - \frac{V}{n} \right) \right] \cdot \exp(\beta \cdot d_m)$$

[0131] (A^* : Richardson 상수, T : 온도, k_B : Boltzmann 상수, $\Phi_{\text{SB,eff}}$: 반도체막과 금 전극 사이의 쇼트키 장벽 높이, n : 이차원 반도체 물질의 ideality factor, β : 단분자의 attenuation factor, d_m : 단분자 길이)

[0134] <수학식 3>

$$\Phi = \frac{\hbar}{2(2m)^{1/2}} \frac{\frac{2(2m)^{1/2}}{\hbar} (\Phi_m)^{1/2} d_m + \frac{2(2m)^{1/2}}{\hbar} (\Phi_{\text{MoS}_2})^{1/2} d_{\text{MoS}_2}}{d_m + d_{\text{MoS}_2}}$$

[0135]

[0136] (d_m : 단분자 길이, d_{MoS_2} : MoS₂ 두께, Φ_m : 단분자 배리어, Φ_{MoS_2} : MoS₂ 배리어)

[0138] 도 10의 (a)에서 확인할 수 있듯이, 상기 실시 예 1(OPT1), 실시 예 2(OPT2), 실시 예 3(C8), 실시 예 4(C10), 및 실시 예 5(C12)의 순서로 전류밀도(J, A/cm²)가 높게 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 또한, 도 10의 (b)에서 확인할 수 있듯이, 반도체막의 두께가 얇을수록 정류비(RR)가 높게 나타나는 것을 확인할 수 있었다.

[0139] 도 12는 본 발명의 실시 예 2에 따른 이중접합 분자 다이오드의 단분자 길이, 단분자 HOMO-LUMO 갭 차이, 및 반도체막 두께에 따라 예측되는 정류비를 나타내는 모식도이다.

[0140] 도 12를 참조하면, 상기 실시 예 2에 따른 이중접합 분자 다이오드를 준비하되, 단분자의 길이(molecular length, 0.5 nm ~ 2.5 nm), 단분자의 HOMO-LUMO 갭 차이(barrier height, 1.5 eV ~ 6.0 eV), 및 반도체막 두께(1_L-MoS₂, 2_L-MoS₂, 3_L-MoS₂)에 따라 예측되는 정류비(RR)를 나타내었다.

[0141] 도 12에서 확인할 수 있듯이, 단분자의 길이가 길고, 단분자의 HOMO-LUMO 갭 차이가 작으며, 반도체막의 두께가 얇을수록 정류비(RR)가 높게 나타나는 것을 확인할 수 있었다.

[0142] 도 13 및 도 14는 본 발명의 실시 예에 따른 이중접합 분자 다이오드의 활용 예를 나타내는 도면이다.

[0143] 도 13 및 도 14를 참조하면, 상기 실시 예에 따른 이중접합 분자 다이오드는, 쌍극자모멘트(Dipole moment)가 다른 분자를 이용하여 정류 특성의 비선형성(Nonlinearity)을 조절할 수 있다. 또한, 적합한 분자와 이차원 반도체 조합(F6H2/1_L-WSe₂)으로 정류 방향이 반대인 소자를 제작할 수 있다. (F6H2: 3,3,4,4,5,5,6,6,7,7,8,8,8-Tridecafluoro-1-octanethiol)

[0145] 이상, 본 발명을 바람직한 실시 예를 사용하여 상세히 설명하였으나, 본 발명의 범위는 특정 실시 예에 한정되는 것은 아니며, 첨부된 특허청구범위에 의하여 해석되어야 할 것이다. 또한, 이 기술분야에서 통상의 지식을 습득한 자라면, 본 발명의 범위에서 벗어나지 않으면서도 많은 수정과 변형이 가능함을 이해하여야 할 것이다.

부호의 설명

[0146] 100: 제1 전극

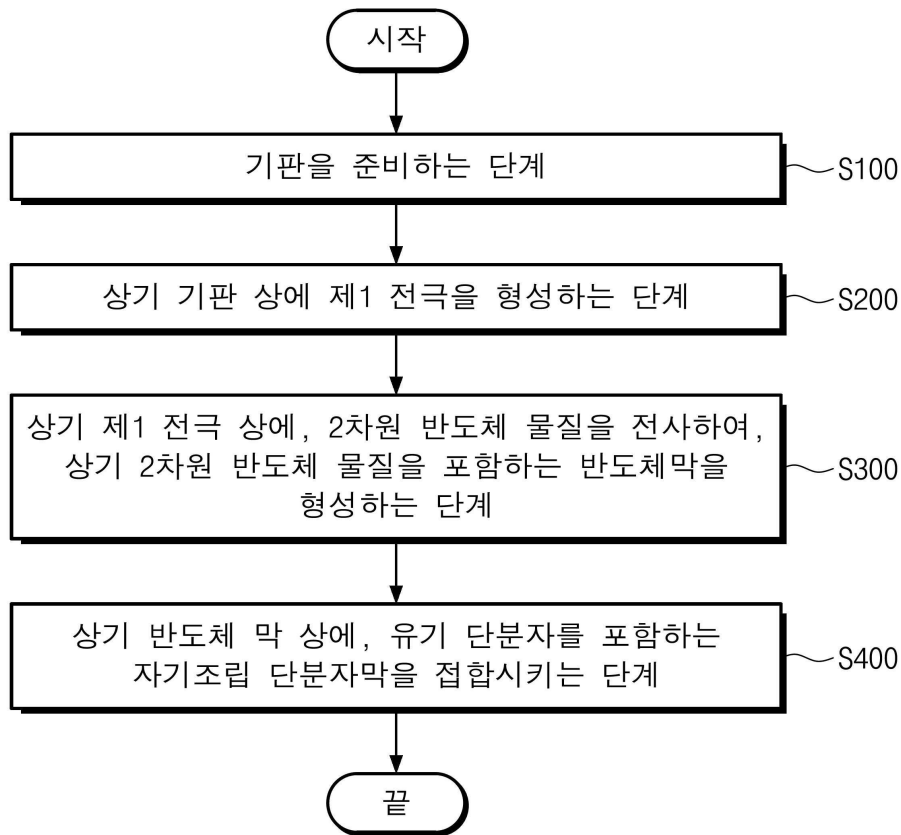
200: 반도체막

300: 자기조립 단분자막

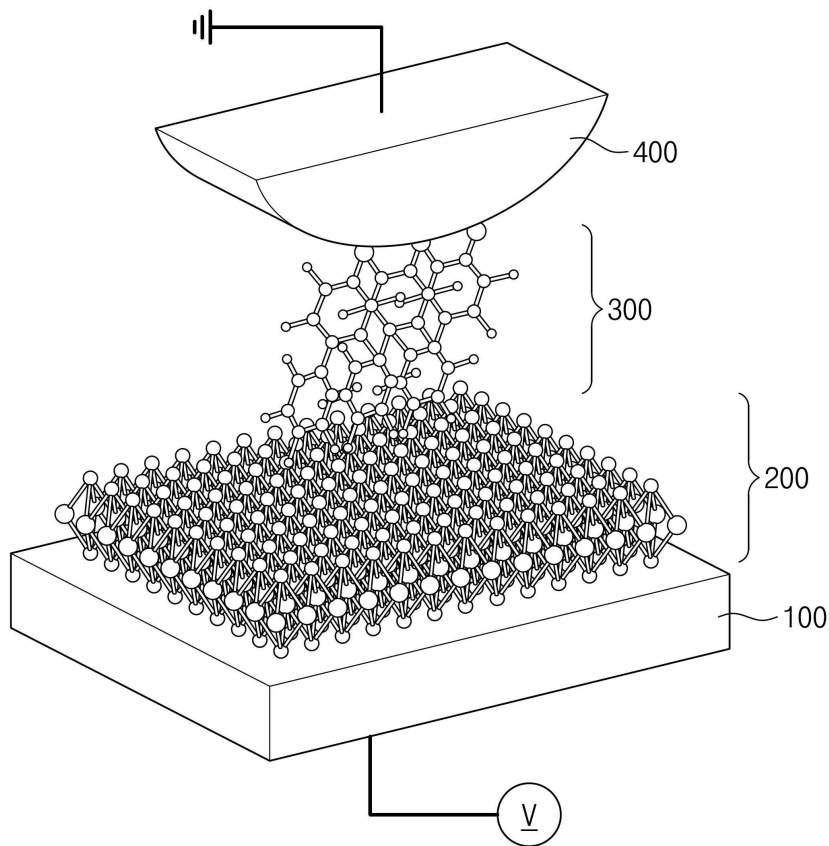
400: 제2 전극

도면

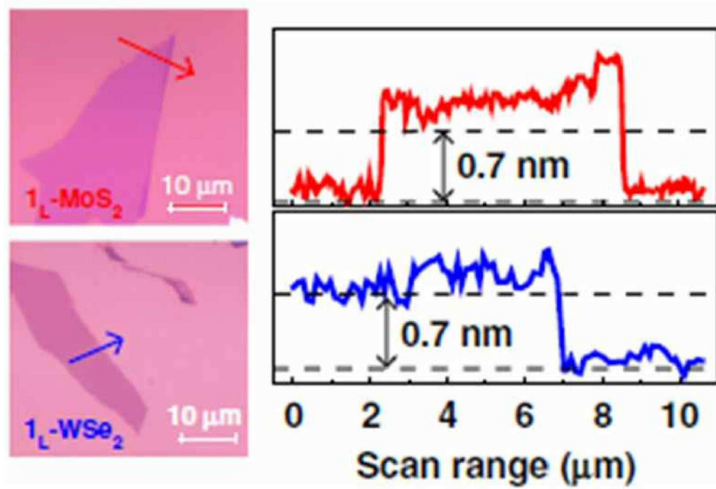
도면1



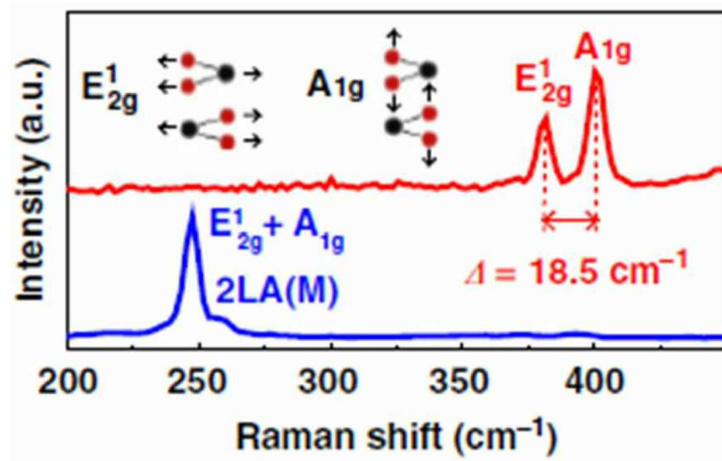
도면2



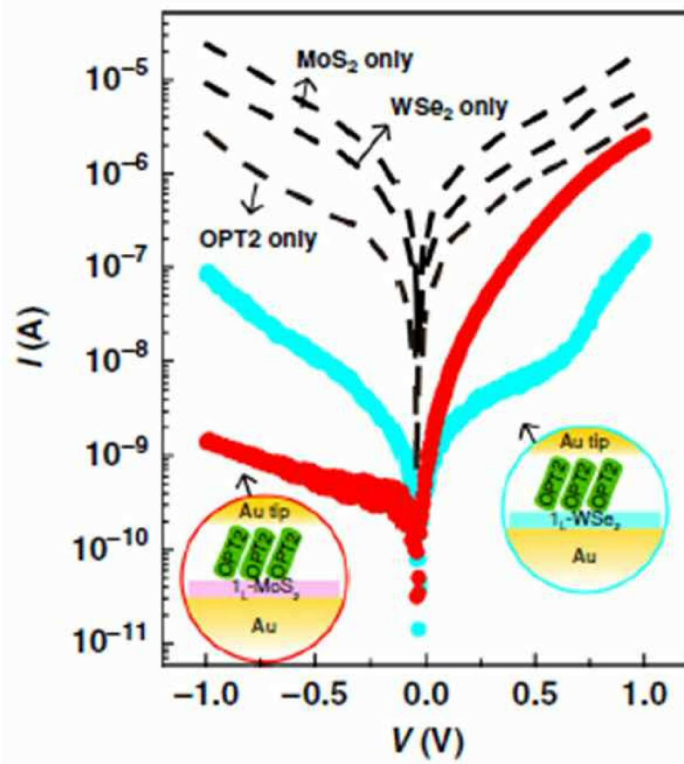
도면3



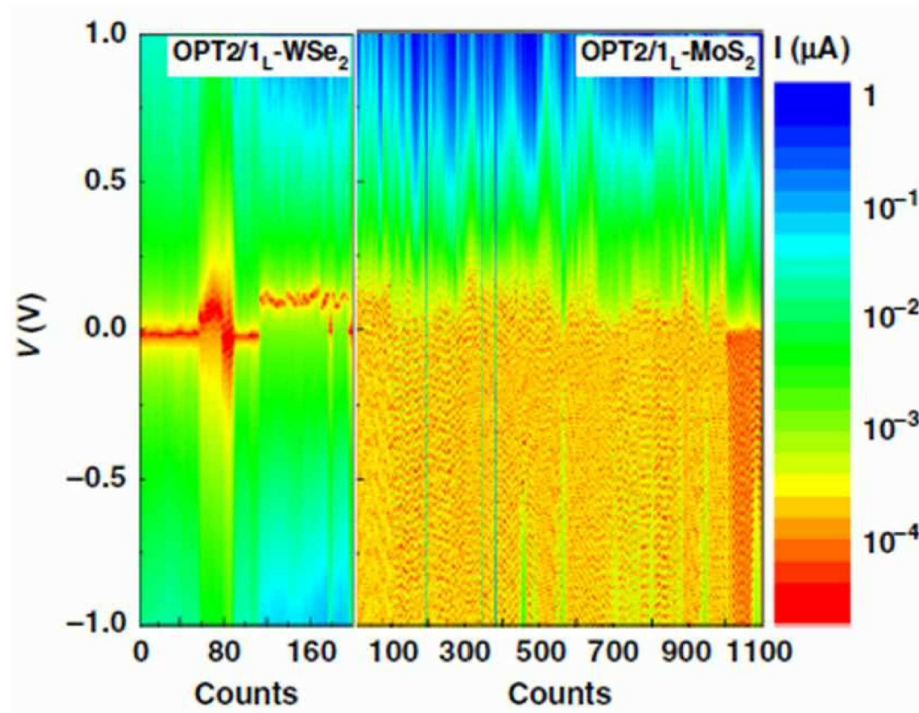
도면4



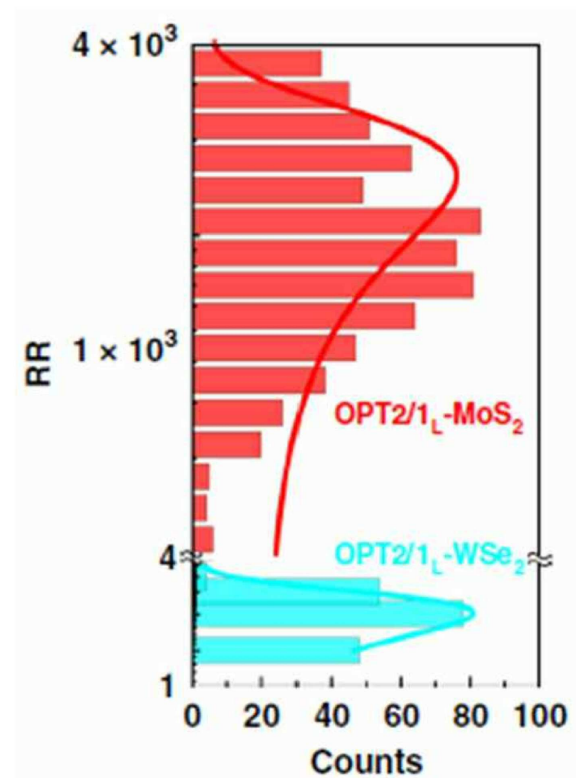
도면5



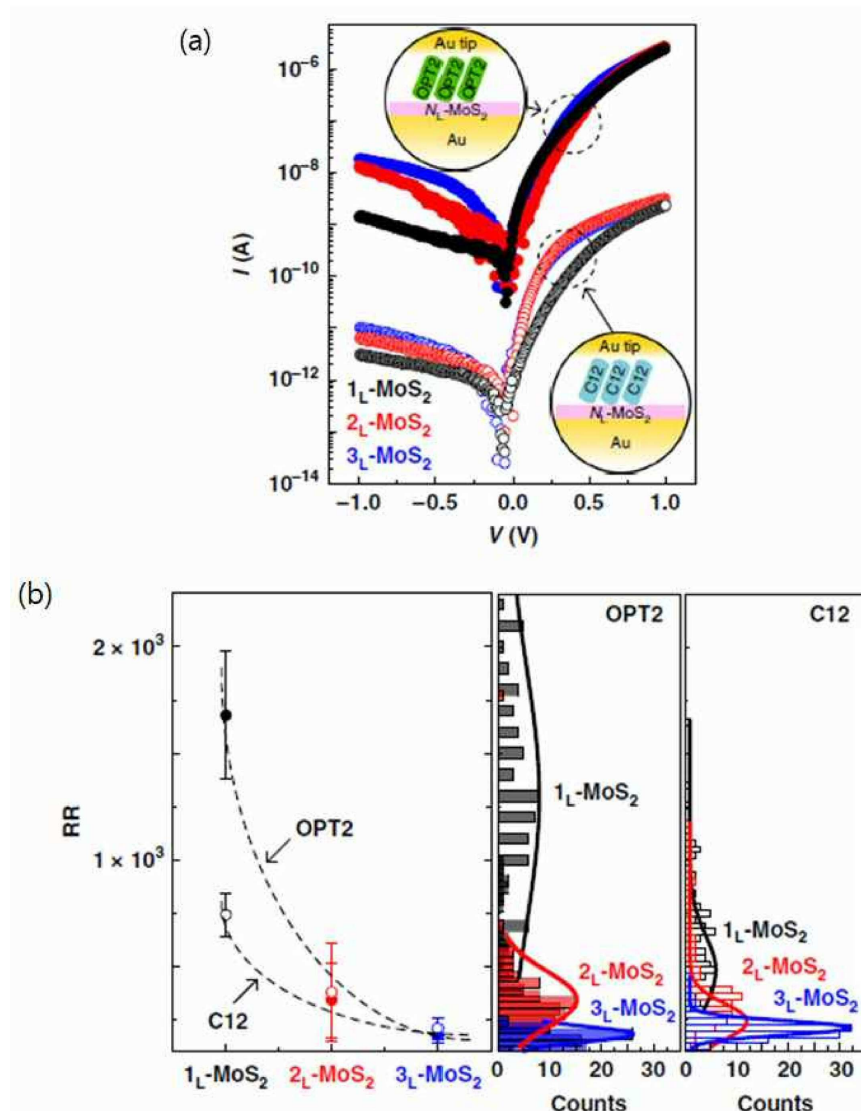
도면6



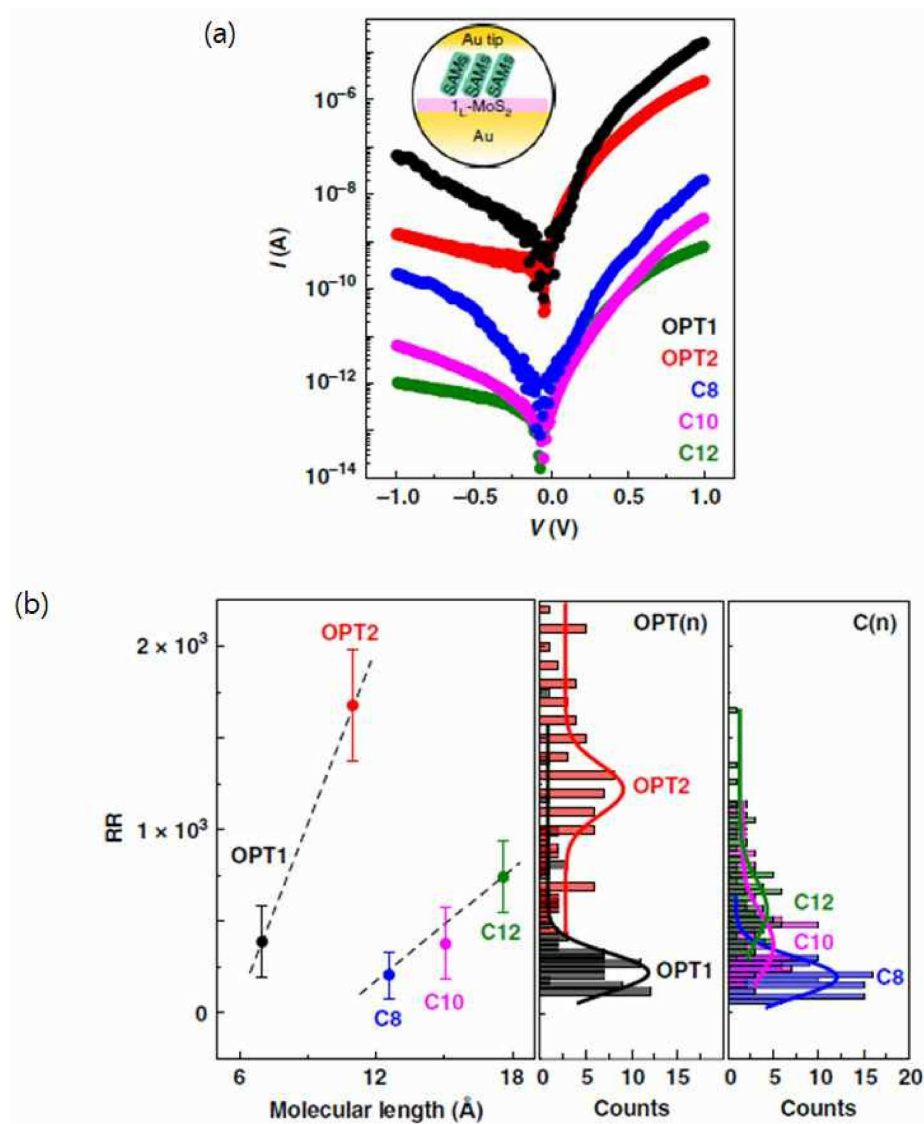
도면7



도면8

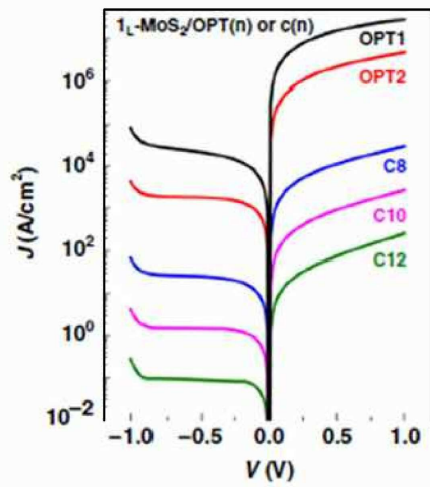


도면9

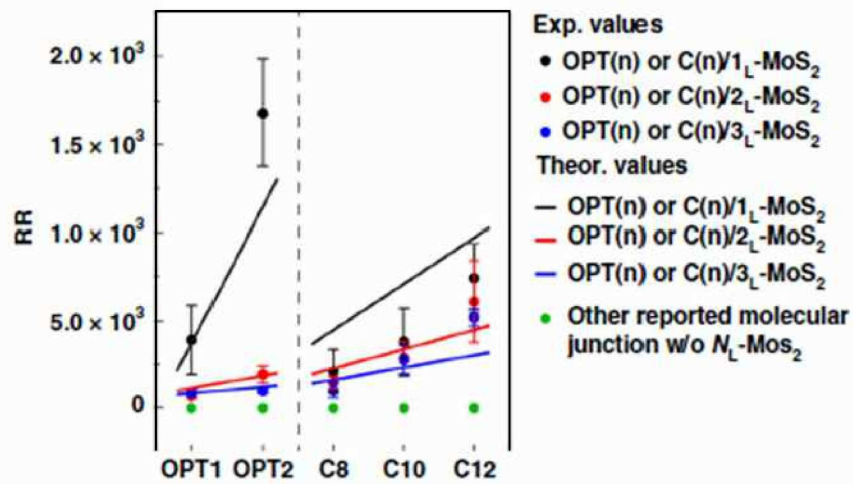


도면10

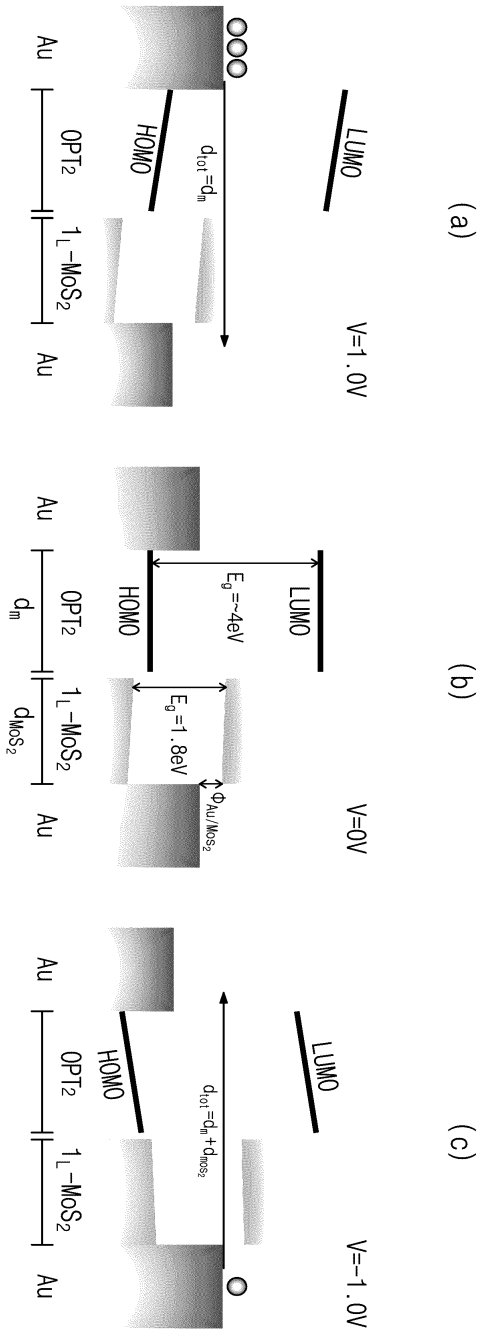
(a)



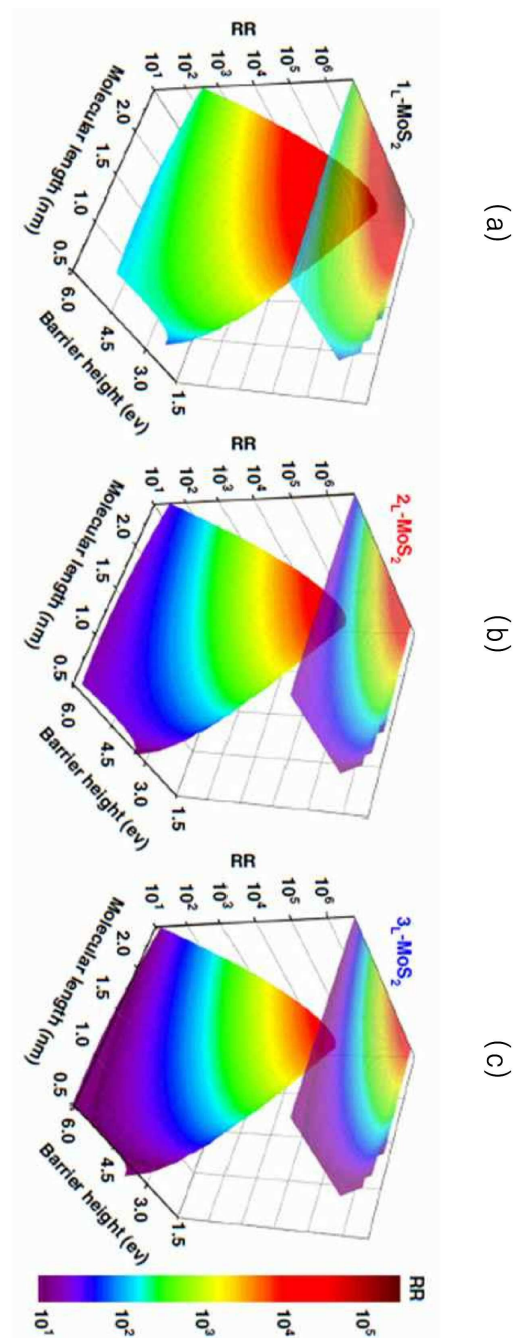
(b)



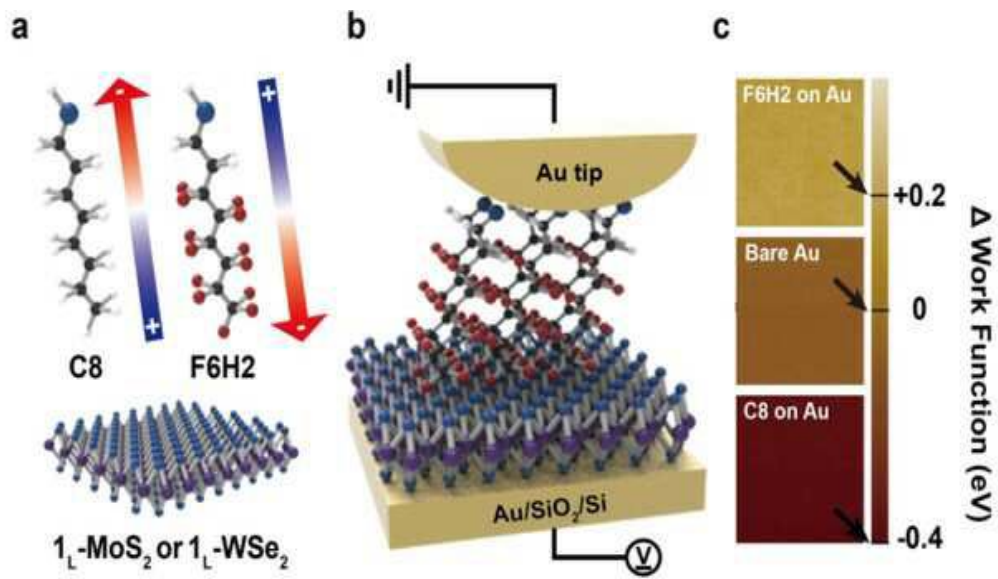
도면11



도면12



도면13



도면14

