



(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2022-0067845
(43) 공개일자 2022년05월25일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
H01L 21/02 (2006.01) C01B 21/064 (2006.01)
C01B 25/00 (2006.01) C01B 25/02 (2006.01)
C01B 32/194 (2017.01) H01L 29/26 (2006.01)
(52) CPC특허분류
H01L 21/02521 (2013.01)
C01B 21/0648 (2013.01)
(21) 출원번호 10-2020-0154545
(22) 출원일자 2020년11월18일
심사청구일자 없음

(71) 출원인
삼성전자주식회사
경기도 수원시 영통구 삼성로 129 (매탄동)
울산과학기술원
울산광역시 울주군 언양읍 유니스트길 50
(72) 발명자
설민수
경기도 수원시 영통구 삼성로 130 (매탄동삼성
전자소재단지연구2동)
신현석
울산광역시 울주군 언양읍 유니스트길 50
(뒷면에 계속)
(74) 대리인
리앤목특허법인

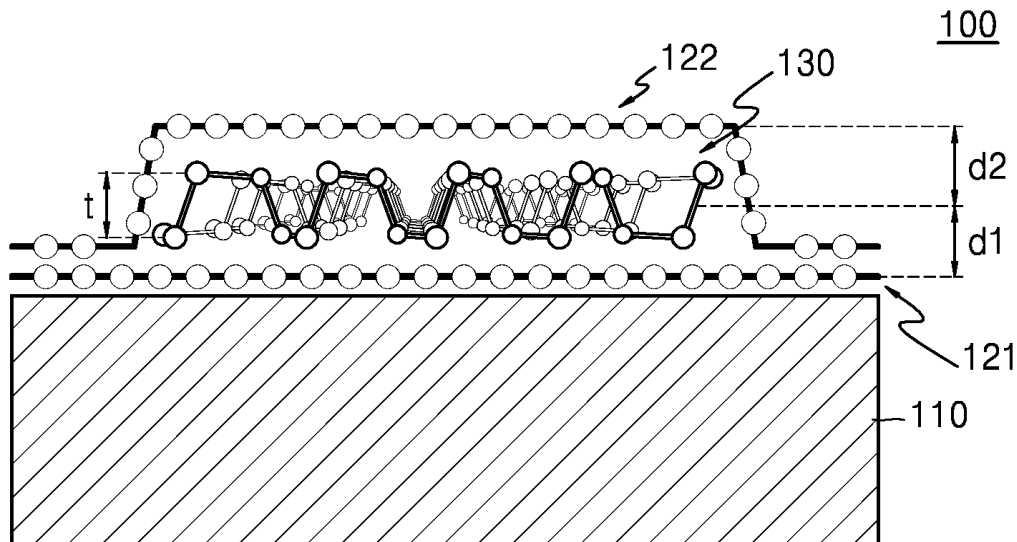
전체 청구항 수 : 총 45 항

(54) 발명의 명칭 흑린-이차원 물질 복합체 및 그 제조방법

(57) 요약

흑린-이차원 물질 복합체 및 그 제조방법이 개시된다. 개시된 흑린-이차원 물질 복합체는, 각각 이차원 결정 구조를 가지며, 반데르발스 힘에 의해 서로 결합되도록 구성된 제1 및 제2 이차원 물질층; 및 상기 제1 및 제2 이차원 물질층 사이에 마련되며 복수개의 인 원자들이 공유 결합된 이차원 결정 구조를 가지는 흑린 시트;를 포함한다.

대표도 - 도1



(52) CPC특허분류

C01B 25/00 (2013.01)

C01B 25/02 (2013.01)

C01B 32/194 (2017.08)

H01L 21/02587 (2013.01)

H01L 21/02612 (2013.01)

H01L 29/26 (2013.01)

C01P 2002/22 (2013.01)

C01P 2004/24 (2013.01)

(72) 발명자

신현진

경기도 수원시 권선구 곡반정로 158, 212동 705호
(곡반정동, 수원하늘채더퍼스트2단지)

황현대

울산광역시 울주군 언양읍 유니스트길 50

이창석

경기도 과천시 관문로 106, 109동 1503호 (중앙동,
과천푸르지오써밋)

윤성인

울산광역시 울주군 언양읍 유니스트길 50

명세서

청구범위

청구항 1

각각 이차원 결정 구조를 가지며, 반데르발스 힘(van der Waals force)에 의해 서로 결합되도록 구성된 제1 및 제2 이차원 물질층; 및

상기 제1 및 제2 이차원 물질층 사이에 마련되며 복수개의 인(phosphorus) 원자들이 공유 결합된 이차원 결정 구조를 가지는 흑린 시트(black phosphorus sheet);를 포함하는 흑린-이차원 물질 복합체.

청구항 2

제 1 항에 있어서,

상기 제1 및 제2 이차원 물질층은 상기 흑린 시트와 다른 이종의 물질을 포함하는 흑린-이차원 물질 복합체.

청구항 3

제 2 항에 있어서,

상기 제1 및 제2 이차원 물질층은 서로 동일한 물질 또는 서로 다른 물질을 포함하는 흑린-이차원 물질 복합체.

청구항 4

제 2 항에 있어서,

상기 제1 및 제2 이차원 물질층 각각은 그래핀(graphene), h-BN(hexagonal-boron nitride), 또는 TMD(transtion metal dichalcogenide)를 포함하는 흑린-이차원 물질 복합체.

청구항 5

제 1 항에 있어서,

상기 제1 및 제2 이차원 물질층 각각은 10nm 이하의 두께를 가지는 흑린-이차원 물질 복합체.

청구항 6

제 1 항에 있어서,

상기 흑린 시트는 10nm 이하의 두께를 가지는 흑린-이차원 물질 복합체.

청구항 7

제 1 항에 있어서,

상기 흑린 시트는 1층 ~ 50층을 포함하는 흑린-이차원 물질 복합체.

청구항 8

제 1 항에 있어서,

상기 제1 및 제2 이차원 물질층 각각은 상기 흑린 시트와 반데르발스 힘에 의해 서로 결합되도록 구성된 흑린-이차원 물질 복합체.

청구항 9

제 1 항에 있어서,

상기 제1 및 제2 이차원 물질층 각각과 상기 흑린 시트 사이의 간격은 0.8nm 이하인 흑린-이차원 물질 복합체.

청구항 10

기관;

이차원 결정 구조를 가지며, 상기 기관과 반데르발스 힘에 의해 서로 결합되도록 구성된 이차원 물질층; 및

상기 기관과 상기 이차원 물질층 사이에 마련되며 복수개의 인 원자들이 공유 결합된 이차원 결정 구조를 가지는 흑린 시트;를 포함하는 흑린-이차원 물질 복합체.

청구항 11

제 10 항에 있어서,

상기 이차원 물질층은 상기 흑린 시트와 다른 이종의 물질을 포함하는 흑린- 이차원 물질 복합체.

청구항 12

제 11 항에 있어서,

상기 이차원 물질층은 그래핀, h-BN, 또는 TMD를 포함하는 흑린-이차원 물질 복합체.

청구항 13

제 10 항에 있어서,

상기 흑린 시트는 10nm 이하의 두께를 가지는 흑린-이차원 물질 복합체.

청구항 14

제 10 항에 있어서,

상기 이차원 물질층과 상기 흑린 시트 사이의 간격은 0.8nm 이하인 흑린-이차원 물질 복합체.

청구항 15

기관에 이차원 결정 구조를 가지는 제1 이차원 물질층을 형성하는 단계;

상기 제1 이차원 물질층에 흑린 전구체막(black phosphorus precursor film)을 형성하는 단계;

상기 제1 이차원 물질층에 상기 흑린 전구체막을 덮도록 이차원 결정 구조를 가지는 제2 이차원 물질층을 형성하는 단계; 및

상기 흑린 전구체막에 열과 압력을 가하여 복수개의 인 원자들이 공유 결합된 이차원 결정 구조를 가지는 흑린 시트를 형성하는 단계;를 포함하는 흑린-이차원 물질 복합체의 제조방법.

청구항 16

제 15 항에 있어서,

상기 흑린 전구체막 주위의 상기 제1 및 제2 이차원 물질층은 반데르발스 힘에 의해 서로 결합되어 있는 흑린-이차원 물질 복합체의 제조방법.

청구항 17

제 15 항에 있어서,

상기 제1 및 제2 이차원 물질층은 상기 흑린 시트와 다른 이종의 물질을 포함하는 흑린- 이차원 물질 복합체의 제조방법.

청구항 18

제 15 항에 있어서,

상기 제1 및 제2 이차원 물질층은 서로 동일한 물질 또는 서로 다른 물질을 포함하는 흑린-이차원 물질 복합체의 제조방법.

청구항 19

제 15 항에 있어서,

상기 제1 및 제2 이차원 물질층 각각은 그래핀, h-BN, 또는 TMD를 포함하는 흑린-이차원 물질 복합체의 제조방법.

청구항 20

제 15 항에 있어서,

상기 제1 및 제2 이차원 물질층 각각은 10nm 이하의 두께를 가지는 흑린-이차원 물질 복합체의 제조방법.

청구항 21

제 15 항에 있어서,

상기 흑린 전구체막은 백린(white phosphorus), 적린(red phosphorus), PI_3 (phosphorus triiodide) 또는 PCl_3 (phosphorus trichloride)를 포함하는 흑린-이차원 물질 복합체의 제조방법.

청구항 22

제 15 항에 있어서,

상기 흑린 전구체막에 가해지는 압력은 400Mpa 이하인 흑린-이차원 물질복합체의 제조방법.

청구항 23

제 15 항에 있어서,

상기 흑린 전구체막에 가해지는 온도는 700℃ 이하인 흑린-이차원 물질 복합체의 제조방법.

청구항 24

제 15 항에 있어서,

상기 흑린 시트는 10nm 이하의 두께를 가지는 흑린-이차원 물질 복합체의 제조방법.

청구항 25

제 15 항에 있어서,

상기 제1 및 제2 이차원 물질층 각각과 상기 흑린 시트 사이의 간격은 0.8nm 이하인 흑린-이차원 물질 복합체의 제조방법.

청구항 26

제1 및 제2 이차원 물질층 사이에 흑린 전구체막을 마련하는 단계; 및

상기 흑린 전구체막에 열과 압력을 가하여 복수개의 인 원자들이 공유 결합된 이차원 결정 구조를 가지는 흑린 시트를 형성하는 단계;를 포함하는 흑린 시트의 제조방법.

청구항 27

제 26 항에 있어서,

상기 흑린 전구체막 주위의 상기 제1 및 제2 이차원 물질층은 반데르발스 힘에 의해 서로 결합되어 있는 흑린 시트의 제조방법.

청구항 28

제 26 항에 있어서,

상기 흑린 전구체막에 가해지는 압력은 400Mpa 이하이고, 상기 흑린 전구체막에 가해지는 온도는 700℃ 이하인

흑린 시트의 제조방법.

청구항 29

기관에 흑린 전구체막을 형성하는 단계;

상기 기관에 상기 흑린 전구체막을 덮도록 이차원 결정 구조를 가지는 이차원 물질층을 형성하는 단계; 및

상기 흑린 전구체막에 열과 압력을 가하여 복수개의 인 원자들이 공유 결합된 이차원 결정 구조를 가지는 흑린 시트를 형성하는 단계;를 포함하는 흑린-이차원 물질 복합체의 제조방법.

청구항 30

제 29 항에 있어서,

상기 흑린 전구체막은 백린, 적린, PI_3 또는 PCl_3 를 포함하는 흑린-이차원 물질 복합체의 제조방법.

청구항 31

제 29 항에 있어서,

상기 흑린 전구체막 주위의 상기 기관과 상기 이차원 물질층은 반데르발스 힘에 의해 서로 결합되어 있는 흑린-이차원 물질 복합체의 제조방법.

청구항 32

제 29 항에 있어서,

상기 이차원 물질층은 상기 흑린 시트와 다른 이종의 물질을 포함하는 흑린-이차원 물질 복합체의 제조방법.

청구항 33

제 29 항에 있어서,

상기 흑린 전구체막에 가해지는 압력은 400Mpa 이하인 흑린-이차원 물질 복합체의 제조방법.

청구항 34

제 29 항에 있어서,

상기 흑린 전구체막에 가해지는 온도는 700℃ 이하인 흑린-이차원 물질 복합체의 제조방법.

청구항 35

기관과 이차원 물질층 사이에 흑린 전구체막을 마련하는 단계; 및

상기 흑린 전구체막에 열과 압력을 가하여 복수개의 인 원자들이 공유 결합된 이차원 결정 구조를 가지는 흑린 시트를 형성하는 단계;를 포함하는 흑린 시트의 제조방법.

청구항 36

제 35 항에 있어서,

상기 흑린 전구체막 주위의 상기 기관과 상기 이차원 물질층은 반데르발스 힘에 의해 서로 결합되어 있는 흑린 시트의 제조방법.

청구항 37

제 35 항에 있어서,

상기 흑린 전구체막에 가해지는 압력은 400Mpa 이하이고, 상기 흑린 전구체막에 가해지는 온도는 700℃ 이하인 흑린 시트의 제조방법.

청구항 38

복수개의 인 원자들이 공유 결합된 이차원 결정 구조를 가지는 흑린 시트;
 상기 흑린 시트의 상면에 마련되며 이차원 결정 구조를 가지는 제1 이차원 물질층;
 상기 흑린 시트의 양측에 각각 마련되는 제1 및 제2 전극; 및
 상기 제1 이차원 물질층의 상부에 마련되는 제3 전극;을 포함하는 전자 소자.

청구항 39

제 38 항에 있어서,
 상기 제1 및 제2 전극은 상기 흑린 시트의 양단부와 각각 에지 컨택(edge contact)을 형성하도록 마련된 전자 소자.

청구항 40

제 38 항에 있어서,
 상기 제1 이차원 물질층은 h-BN을 포함하는 전자 소자.

청구항 41

제 38 항에 있어서,
 상기 제1 및 제2 전극은 상기 제1 이차원 물질층의 양측과 각각 평면 컨택(planar contact)을 형성하도록 마련된 전자 소자.

청구항 42

제 41 항에 있어서,
 상기 제1 이차원 물질층은 h-BN을 포함하는 전자 소자.

청구항 43

제 41 항에 있어서,
 상기 제1 이차원 물질층은 상기 제1 및 제2 전극과 평면 컨택을 형성하는 그래핀과, 상기 제1 및 제2 전극 사이에 마련되는 플루오린화 그래핀(fluorinated graphene)을 포함하는 전자 소자.

청구항 44

제 38 항에 있어서,
 상기 전자 소자는 상기 흑린 시트의 상면에 마련되며 이차원 결정 구조를 가지는 제2 이차원 물질층을 더 포함하는 전자 소자.

청구항 45

제 44 항에 있어서,
 상기 제2 이차원 물질층은 상기 제1 이차원 물질층과 동일한 물질 또는 다른 물질을 포함하는 전자 소자.

발명의 설명

기술 분야

본 개시는 흑린-이차원 물질 복합체 및 그 제조방법에 관한 것이다.

배경 기술

흑린(BP:black phosphorus)은 층상 구조를 가지는 물질로서, 각 층은 인(P) 원자들이 평면적으로 결합된 이차원

[0001]

[0002]

결정 구조를 가진다. 흑린은 반도체 특성을 가지며, 두께에 따라 대략 0.3 eV ~ 1.5eV의 밴드갭 에너지를 가지고 있다. 또한, 흑린은 대략 $1000 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ 의 높은 전하이동도(charge mobility)와 $10^4 \sim 10^5$ 정도의 높은 온/오프 전류비(on/off current ratio)을 가지고 있어 다양한 분야의 전자 소자에 응용되고 있다.

[0003] 이차원 흑린(2D BP)은 수십 nm 이하의 두께를 가지는 시트 형태의 이차원 물질을 말한다. 이러한 이차원 흑린은 벌크형 흑린(bulk black phosphorus)에 기계적 또는 화학적 박리를 수행하는 방법으로 제조할 수 있지만, 이러한 방법을 대면적에 적용하기에는 어려움이 있다.

발명의 내용

해결하려는 과제

[0004] 예시적인 실시예는 흑린-이차원 물질 복합체 및 그 제조방법을 제공한다.

과제의 해결 수단

- [0005] 일 측면에 있어서,
- [0006] 각각 이차원 결정 구조를 가지며, 반데르발스 힘(van der Waals force)에 의해 서로 결합되도록 구성된 제1 및 제2 이차원 물질층; 및
- [0007] 상기 제1 및 제2 이차원 물질층 사이에 마련되며 복수개의 인(phosphorus) 원자들이 공유 결합된 이차원 결정 구조를 가지는 흑린 시트(black phosphorus sheet);를 포함하는 흑린-이차원 물질 복합체가 제공된다.
- [0008] 상기 제1 및 제2 이차원 물질층은 상기 흑린 시트와 다른 종류의 물질을 포함할 수 있다.
- [0009] 상기 제1 및 제2 이차원 물질층은 서로 동일한 물질 또는 서로 다른 물질을 포함할 수 있다. 상기 제1 및 제2 이차원 물질층 각각은 그래핀(graphene), h-BN(hexagonal-boron nitride), 또는 TMD(transtion metal dichalcogenide)를 포함할 수 있다.
- [0010] 상기 제1 및 제2 이차원 물질층 각각은 10nm 이하의 두께를 가질 수 있다.
- [0011] 상기 흑린 시트는 10nm 이하의 두께를 가질 수 있다. 상기 흑린 시트는 1층 ~ 50층을 포함할 수 있다.
- [0012] 상기 제1 및 제2 이차원 물질층 각각은 상기 흑린 시트와 반데르발스 힘에 의해 서로 결합되도록 구성될 수 있다.
- [0013] 상기 제1 및 제2 이차원 물질층 각각과 상기 흑린 시트 사이의 간격은 0.8nm 이하가 될 수 있다.
- [0014] 다른 측면에 있어서,
- [0015] 기판;
- [0016] 이차원 결정 구조를 가지며, 상기 기판과 반데르발스 힘에 의해 서로 결합되도록 구성된 이차원 물질층; 및
- [0017] 상기 기판과 상기 이차원 물질층 사이에 마련되며 복수개의 인 원자들이 공유 결합된 이차원 결정 구조를 가지는 흑린 시트;를 포함하는 흑린-이차원 물질 복합체가 제공된다.
- [0018] 상기 이차원 물질층은 상기 흑린 시트와 다른 종류의 물질을 포함할 수 있다. 상기 이차원 물질층은 그래핀, h-BN, 또는 TMD를 포함할 수 있다.
- [0019] 상기 흑린 시트는 10nm 이하의 두께를 가질 수 있다.
- [0020] 상기 이차원 물질층과 상기 흑린 시트 사이의 간격은 0.8nm 이하가 될 수 있다.
- [0021] 또 다른 측면에 있어서,
- [0022] 기판에 이차원 결정 구조를 가지는 제1 이차원 물질층을 형성하는 단계;
- [0023] 상기 제1 이차원 물질층에 흑린 전구체막(black phosphorus precursor film)을 형성하는 단계;
- [0024] 상기 제1 이차원 물질층에 상기 흑린 전구체막을 덮도록 이차원 결정 구조를 가지는 제2 이차원 물질층을 형성하는 단계; 및

- [0025] 상기 흑린 전구체막에 열과 압력을 가하여 복수개의 인 원자들이 공유 결합된 이차원 결정 구조를 가지는 흑린 시트를 형성하는 단계;를 포함하는 흑린-이차원 물질 복합체의 제조방법이 제공된다.
- [0026] 상기 흑린 전구체막 주위의 상기 제1 및 제2 이차원 물질층은 반데르발스 힘에 의해 서로 결합될 수 있다.
- [0027] 상기 제1 및 제2 이차원 물질층은 상기 흑린 시트와 다른 이종의 물질을 포함할 수 있다.
- [0028] 상기 제1 및 제2 이차원 물질층은 서로 동일한 물질 또는 서로 다른 물질을 포함할 수 있다. 상기 제1 및 제2 이차원 물질층 각각은 그래핀, h-BN, 또는 TMD를 포함할 수 있다.
- [0029] 상기 제1 및 제2 이차원 물질층 각각은 10nm 이하의 두께를 가질 수 있다.
- [0030] 상기 흑린 전구체막은 백린(white phosphorus), 적린(red phosphorus), PI_3 (phosphorus triiodide) 또는 PCl_3 (phosphorus trichloride)를 포함할 수 있다.
- [0031] 상기 흑린 전구체막에 가해지는 압력은 400Mpa 이하가 될 수 있다. 상기 흑린 전구체막에 가해지는 온도는 700℃ 이하가 될 수 있다.
- [0032] 상기 흑린 시트는 10nm 이하의 두께를 가질 수 있다. 상기 제1 및 제2 이차원 물질층 각각과 상기 흑린 시트 사이의 간격은 0.8nm 이하가 될 수 있다.
- [0033] 또 다른 측면에 있어서,
- [0034] 제1 및 제2 이차원 물질층 사이에 흑린 전구체막을 마련하는 단계; 및
- [0035] 상기 흑린 전구체막에 열과 압력을 가하여 복수개의 인 원자들이 공유 결합된 이차원 결정 구조를 가지는 흑린 시트를 형성하는 단계;를 포함하는 흑린 시트의 제조방법이 제공된다.
- [0036] 상기 흑린 전구체막 주위의 상기 제1 및 제2 이차원 물질층은 반데르발스 힘에 의해 서로 결합될 수 있다.
- [0037] 상기 흑린 전구체막에 가해지는 압력은 400Mpa 이하이고, 상기 흑린 전구체막에 가해지는 온도는 700℃ 이하가 될 수 있다.
- [0038] 또 다른 측면에 있어서,
- [0039] 기판에 흑린 전구체막을 형성하는 단계;
- [0040] 상기 기판에 상기 흑린 전구체막을 덮도록 이차원 결정 구조를 가지는 이차원 물질층을 형성하는 단계; 및
- [0041] 상기 흑린 전구체막에 열과 압력을 가하여 복수개의 인 원자들이 공유 결합된 이차원 결정 구조를 가지는 흑린 시트를 형성하는 단계;를 포함하는 흑린-이차원 물질 복합체의 제조방법이 제공된다.
- [0042] 상기 흑린 전구체막은 백린, 적린, PI_3 또는 PCl_3 를 포함할 수 있다.
- [0043] 상기 흑린 전구체막 주위의 상기 기판과 상기 이차원 물질층은 반데르발스 힘에 의해 서로 결합될 수 있다.
- [0044] 상기 이차원 물질층은 상기 흑린 시트와 다른 이종의 물질을 포함할 수 있다.
- [0045] 상기 흑린 전구체막에 가해지는 압력은 400Mpa 이하가 될 수 있다. 상기 흑린 전구체막에 가해지는 온도는 700℃ 이하가 될 수 있다.
- [0046] 또 다른 측면에 있어서,
- [0047] 기판과 이차원 물질층 사이에 흑린 전구체막을 마련하는 단계; 및
- [0048] 상기 흑린 전구체막에 열과 압력을 가하여 복수개의 인 원자들이 공유 결합된 이차원 결정 구조를 가지는 흑린 시트를 형성하는 단계;를 포함하는 흑린 시트의 제조방법이 제공된다.
- [0049] 상기 흑린 전구체막 주위의 상기 기판과 상기 이차원 물질층은 반데르발스 힘에 의해 서로 결합될 수 있다.
- [0050] 상기 흑린 전구체막에 가해지는 압력은 400Mpa 이하이고, 상기 흑린 전구체막에 가해지는 온도는 700℃ 이하가 될 수 있다.
- [0051] 또 다른 측면에 있어서,

- [0052] 복수개의 인 원자들이 공유 결합된 이차원 결정 구조를 가지는 흑린 시트;
- [0053] 상기 흑린 시트의 상면에 마련되며 이차원 결정 구조를 가지는 제1 이차원 물질층;
- [0054] 상기 흑린 시트의 양측에 각각 마련되는 제1 및 제2 전극; 및
- [0055] 상기 제1 이차원 물질층의 상부에 마련되는 제3 전극;을 포함하는 전자 소자가 제공된다.
- [0056] 상기 제1 및 제2 전극은 상기 흑린 시트의 양단부와 각각 에지 컨택(edge contact)을 형성하도록 마련될 수 있다.
- [0057] 상기 제1 이차원 물질층은 h-BN을 포함할 수 있다.
- [0058] 상기 제1 및 제2 전극은 상기 제1 이차원 물질층의 양측과 각각 평면 컨택(planar contact)을 형성하도록 마련될 수 있다.
- [0059] 상기 제1 이차원 물질층은 상기 제1 및 제2 전극과 평면 컨택을 형성하는 그래핀과, 상기 제1 및 제2 전극 사이에 마련되는 플루오린화 그래핀(fluorinated graphene)을 포함할 수 있다.
- [0060] 상기 전자 소자는 상기 흑린 시트의 상면에 마련되며 이차원 결정 구조를 가지는 제2 이차원 물질층을 더 포함할 수 있다.
- [0061] 상기 제2 이차원 물질층은 상기 제1 이차원 물질층과 동일한 물질 또는 다른 물질을 포함할 수 있다.

발명의 효과

- [0062] 예시적인 실시예에 의하면, 제1 및 제2 이차원 물질층 사이 또는 기판과 이차원 물질층 사이에 형성되는 큰 반데르발스 압력을 이용하여 상압(atmospheric pressure)과 같은 비교적 낮은 압력에서도 흑린 시트 및 흑린-이차원 물질 복합체를 용이하게 형성할 수 있다.
- [0063] 또한, 흑린 시트가 제1 및 제2 이차원 물질층에 의해 봉지됨으로써 흑린 시트는 산화 등과 같은 외부 영향으로부터 보호될 수 있다. 이러한 흑린 시트는 반도체 특성, 높은 전하이동도 및 높은 온/오프 전류비를 가지고 있으므로 이를 포함하는 흑린-이차원 복합체는 전계 효과 트랜지스터(FET) 또는 포토디텍터(photodetector) 등과 같은 다양한 전자 소자에 적용될 수 있다.

도면의 간단한 설명

- [0064] 도 1은 예시적인 실시예에 따른 흑린-이차원 물질 복합체를 도시한 단면도이다.
- 도 2는 다른 예시적인 실시예에 따른 흑린-이차원 물질 복합체를 도시한 단면도이다.
- 도 3은 또 다른 예시적인 실시예에 따른 흑린-이차원 물질 복합체를 도시한 단면도이다.
- 도 4 내지 도 9는 예시적인 실시예에 따른 흑린-이차원 물질 복합체의 제조방법을 설명하기 위한 도면들이다.
- 도 10a 및 도 10b는 도 4 내지 도 9에 도시된 방법으로 제작된 흑린-이차원 물질 복합체에 대한 라만 스펙트럼을 도시한 것이다.
- 도 11 내지 도 15는 다른 예시적인 실시예에 따른 흑린-이차원 물질 복합체의 제조방법을 설명하기 위한 도면들이다.
- 도 16은 예시적인 실시예에 따른 전자 소자를 도시한 것이다.
- 도 17은 다른 예시적인 실시예에 따른 전자 소자를 도시한 것이다.
- 도 18은 또 다른 예시적인 실시예에 따른 전자 소자를 도시한 것이다.
- 도 19는 또 다른 예시적인 실시예에 따른 전자 소자를 도시한 것이다.
- 도 20은 또 다른 예시적인 실시예에 따른 전자 소자를 도시한 것이다.
- 도 21은 또 다른 예시적인 실시예에 따른 전자 소자를 도시한 것이다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

- [0065] 이하, 첨부된 도면을 참조하여 예시적인 실시예들에 대해 상세히 설명하기로 한다. 이하의 도면들에서 동일한 참조부호는 동일한 구성요소를 지칭하며, 도면상에서 각 구성요소의 크기는 설명의 명료성과 편의상 과장되어 있을 수 있다. 한편, 이하에 설명되는 실시예는 단지 예시적인 것에 불과하며, 이러한 실시예들로부터 다양한 변형이 가능하다.
- [0066] 이하에서, "상부" 나 "상"이라고 기재된 것은 접촉하여 바로 위, 아래, 좌, 우에 있는 것뿐만 아니라 비접촉으로 위, 아래, 좌, 우에 있는 것도 포함할 수 있다. 단수의 표현은 문맥상 명백하게 다르게 뜻하지 않는 한, 복수의 표현을 포함한다. 또한 어떤 부분이 어떤 구성요소를 "포함"한다고 할 때, 이는 특별히 반대되는 기재가 없는 한 다른 구성요소를 제외하는 것이 아니라 다른 구성요소를 더 포함할 수 있는 것을 의미한다.
- [0067] "상기"의 용어 및 이와 유사한 지시 용어의 사용은 단수 및 복수 모두에 해당하는 것일 수 있다. 방법을 구성하는 단계들에 대하여 명백하게 순서를 기재하거나 반하는 기재가 없다면, 이러한 단계들은 적당한 순서로 행해질 수 있으며, 반드시 기재된 순서에 한정되는 것은 아니다.
- [0068] 또한, 명세서에 기재된 "...부", "모듈" 등의 용어는 적어도 하나의 기능이나 동작을 처리하는 단위를 의미하며, 이는 하드웨어 또는 소프트웨어로 구현되거나 하드웨어와 소프트웨어의 결합으로 구현될 수 있다.
- [0069] 도면에 도시된 구성 요소들 간의 선들의 연결 또는 연결 부재들은 기능적인 연결 및/또는 물리적 또는 회로적 연결들을 예시적으로 나타낸 것으로서, 실제 장치에서는 대체 가능하거나 추가의 다양한 기능적인 연결, 물리적인 연결, 또는 회로 연결들로서 나타내어질 수 있다.
- [0070] 모든 예들 또는 예시적인 용어의 사용은 단순히 기술적 사상을 상세히 설명하기 위한 것으로서 청구범위에 의해 한정되지 않는 이상 이러한 예들 또는 예시적인 용어로 인해 범위가 한정되는 것은 아니다.
- [0071] 도 1은 예시적인 실시예에 따른 흑린-이차원 물질 복합체를 도시한 단면도이다.
- [0072] 도 1을 참조하면, 흑린-이차원 물질 복합체(100)는 제1 및 제2 이차원 물질층(121,122)과, 제1 및 제2 이차원 물질층(121,122) 사이에 마련되는 흑린 시트(black phosphorus sheet, 130)를 포함한다. 여기서, 흑린 시트(130)는 제1 및 제2 이차원 물질층(121,122)에 의해 봉지(encapsulation)될 수 있다.
- [0073] 제1 이차원 물질층(121)은 기판(110)의 상면에 마련될 수 있다. 기판(110)으로는 반도체 기판 또는 절연성 기판 등과 같은 다양한 재질의 기판이 사용될 수 있다. 제1 이차원 물질층(121)은 구성 원자들이 평면적으로 결합된 이차원 결정 구조를 가지는 물질을 포함할 수 있다. 예를 들면, 제1 이차원 물질층(121)은 흑린 시트(130)와는 다른 이종의 이차원 물질을 포함할 수 있다. 이러한 제1 이차원 물질층(121)은 기판(110)의 상면과 반데르발스 힘(van der Waals force)에 의해 결합되도록 형성될 수 있다.
- [0074] 제1 이차원 물질층(121)은 단층 구조 또는 다층 구조를 가질 수 있다. 제1 이차원 물질층(121)은 예를 들면, 대략 10nm 이하의 두께를 가질 수 있다. 도 1에는 제1 이차원 물질층(121)이 단층 구조를 가지는 경우가 예시적으로 도시되어 있다. 제1 이차원 물질층(121)이 다층 구조를 가지는 경우에는 적층된 층들은 반데르발스 힘에 의해 서로 결합될 수 있다.
- [0075] 제1 이차원 물질층(121)은 예를 들면, 도전성의 이차원 물질인 그래핀(graphene)을 포함할 수 있다. 그래핀은 탄소 원자들이 이차원적으로 공유 결합된 육각형 벌집 구조(hexagonal honeycomb) 구조를 가지는 이차원 물질이다.
- [0076] 제1 이차원 물질층(121)이 단층 그래핀으로 이루어진 경우에는 제1 이차원 물질층(121)은 대략 0.34nm 정도의 두께를 가질 수 있다. 또한, 제1 이차원 물질층(121)이 다층 그래핀으로 이루어진 경우에는 적층된 층들 사이의 간격은 예를 들면, 대략 0.34nm 정도가 될 수 있다. 여기서, 층들 사이의 간격은 각 층의 중심부 사이의 거리를 의미한다.
- [0077] 제1 이차원 물질층(121)은 예를 들면, 절연성 이차원 물질인 h-BN(hexagonal-Boron Nitride)를 포함할 수 있다. 또한, 제1 이차원 물질층(121)은 예를 들면, 반도체 특성을 가지는 이차원 물질인 TMD(transton metal dichalcogenide)를 포함할 수 있다.
- [0078] TMD는 열적 안정성 및 기계적 강도가 우수하고, 높은 열전도도를 가지고 있는 이차원 물질이다. TMD는 예를 들면, Mo, W, Nb, V, Ta, Ti, Zr, Hf, Tc, Re, Cu, Ga, In, Sn, Ge, Pb 중 하나의 금속 원소와 S, Se, Te 중 하나의 칼코겐 원소를 포함할 수 있다. 그러나, 이상에서 언급된 물질들은 단지 예시적인 것이고, 그 밖에 다른 물질들이 TMD 물질로 사용될 수도 있다.

- [0079] 제1 이차원 물질층(121)의 상면에는 흑린 시트(130)가 마련되어 있다. 여기서, 흑린 시트(130)는 제1 이차원 물질층(121)의 면적과 같거나 작은 면적으로 제1 이차원 물질층(121)에 마련될 수 있다. 즉, 흑린 시트(130)는 제1 이차원 물질층(121)의 외곽 부분을 돌출하지 않도록 마련될 수 있다.
- [0080] 흑린 시트(130)는 인 원자들이 공유결합된 이차원 결정 구조(구체적으로, 주름진 벌집 구조)를 가지는 이차원 물질이다. 이러한 흑린 시트(130)는 단층 구조 또는 다층 구조를 가질 수 있다. 도 1에는 흑린 시트(130)가 단층 구조를 가지는 경우가 예시적으로 도시되어 있다. 하지만, 후술하는 바와 같이 흑린 시트(130)는 다층 구조를 가질 수도 있다. 흑린 시트(130)는 예를 들면, 1층 ~ 50층을 포함할 수 있다. 이 경우, 흑린 시트(130)는 대략 10nm 이하의 두께를 가질 수 있다.
- [0081] 흑린 시트(130)가 단층 구조를 가지는 경우에 흑린 시트(130)는 대략 0.5nm의 두께(t)를 가질 수 있다. 흑린 시트(130)는 반데르발스 힘에 의해 제1 이차원 물질층(121)과 결합되도록 형성될 수 있다. 제1 이차원 물질층(121)과 흑린 시트(130) 사이의 간격(d1)은 예를 들면 대략 0.8nm 이하가 될 수 있다. 여기서, 제1 이차원 물질층(121)과 흑린 시트(130) 사이의 간격(d1)은 제1 이차원 물질층(121)의 중심부와 흑린 시트(130)의 중심부 사이의 거리를 의미한다.
- [0082] 흑린 시트(130)의 상면에는 제2 이차원 물질층(122)이 마련되어 있다. 제2 이차원 물질층(122)은 제1 이차원 물질층(121)과 마찬가지로 구성 원자들이 평면적으로 결합된 이차원 결정 구조를 가지는 물질을 포함할 수 있다. 제2 이차원 물질층(122)은 흑린 시트(130)와는 다른 종류의 이차원 물질을 포함할 수 있다.
- [0083] 제2 이차원 물질층(122)은 단층 구조 또는 다층 구조를 가질 수 있다. 제2 이차원 물질층(122)은 예를 들면, 대략 10nm 이하의 두께를 가질 수 있다. 도 1에는 제2 이차원 물질층(122)이 단층 구조를 가지는 경우가 예시적으로 도시되어 있다. 제2 이차원 물질층(122)이 다층 구조를 가지는 경우에는 적층된 층들은 반데르발스 힘에 의해 서로 결합될 수 있다.
- [0084] 제2 이차원 물질층(122)은 예를 들면, 그래핀, h-BN, 또는 TMD를 포함할 수 있다. 제2 이차원 물질층(122)은 제1 이차원 물질층(121)과 동일한 물질을 포함할 수 있다. 예를 들면, 제1 및 제2 이차원 물질층(121, 122)은 모두 그래핀을 포함하거나 또는 모두 h-BN을 포함할 수 있다. 또한, 제2 이차원 물질층(122)은 제1 이차원 물질층(121)과 다른 물질을 포함할 수도 있다. 예를 들면, 제1 이차원 물질층(121)은 h-BN을 포함하고, 제2 이차원 물질층(122)은 그래핀을 포함할 수 있다. 하지만, 이는 단지 예시적인 것이다.
- [0085] 제2 이차원 물질층(122)은 흑린 시트(130)의 면적과 같거나 큰 면적으로 마련될 수 있다. 즉, 제2 차원 물질층(122)은 흑린 시트(130) 전체를 덮도록 마련될 수 있다. 이에 따라, 흑린 시트(130)는 제2 이차원 물질층(121)의 외곽 부분을 돌출하지 않도록 마련될 수 있다. 흑린 시트(130) 주위에 있는 제1 이차원 물질층(121)의 외곽 부분과 제2 이차원 물질층(122)의 외곽 부분은 반데르발스 힘에 의해 서로 결합되도록 마련될 수 있다. 이와 같이, 외곽 부분이 반데르발스 힘에 의해 서로 결합된 제1 및 제2 이차원 물질층(121, 122) 사이에 흑린 시트(130)가 마련됨으로써 흑린 시트(130)는 제1 및 제2 이차원 물질층(121, 122)에 의해 봉지될 수 있다.
- [0086] 흑린 시트(130)에 마련된 제2 이차원 물질층(122)은 반데르발스 힘에 의해 흑린 시트(130)와 결합되도록 형성될 수 있다. 여기서, 제2 이차원 물질층(122)과 흑린 시트(130) 사이의 간격(d2)은 예를 들면 대략 0.8nm 이하가 될 수 있다. 제2 이차원 물질층(122)과 흑린 시트(130) 사이의 간격(d2)은 제2 이차원 물질층(122)의 중심부와 흑린 시트(130)의 중심부 사이의 거리를 의미한다.
- [0087] 이상의 예시적인 실시예에 따른 흑린-이차원 복합체(100)에서는, 흑린 시트(130)가 반데르발스 힘에 의해 서로 결합된 제1 및 제2 이차원 물질층(121, 122) 사이에 마련되어 봉지됨으로써 흑린 시트(130)는 산화 등과 같은 외부 영향으로부터 보호될 수 있다. 또한, 흑린 시트(130)는 반도체 특성, 높은 전하이동도 및 높은 온/오프 전류비를 가지고 있으므로 예시적인 실시예에 따른 흑린-이차원 복합체(100)는 전계 효과 트랜지스터(FET; Field Effect Transistor) 또는 포토디텍터(photodetector) 등과 같은 다양한 전자 소자에 적용될 수 있다.
- [0088] 도 2는 다른 예시적인 실시예에 따른 흑린-이차원 물질 복합체를 도시한 단면도이다. 도 2에 도시된 흑린-이차원 물질 복합체(200)는 흑린 시트(230)가 다층 구조를 가지고 있다는 점을 제외하면 도 1에 도시된 흑린-이차원 물질 복합체(100)와 동일하다.
- [0089] 도 2를 참조하면, 흑린 시트(230)는 상하로 적층된 제1층(231) 및 제2층(232)을 포함한다. 여기서, 제1층(231)과 제2층(232) 사이의 간격은 대략 0.5nm가 될 수 있다. 제1층(231)과 제2층(232) 사이의 간격(d3)은 제1층(231)의 중심부와 제2층(232)의 중심부 사이의 거리를 의미한다. 이상에서는 흑린 시트(230)가 2개의 층

(231,232)으로 구성된 경우가 설명되었으나, 이에 한정되지 않고 흑린 시트(230)는 다양한 개수의 층으로 구성될 수 있다. 예를 들면, 흑린 시트(230)는 1층 ~ 50층을 포함할 수 있다. 이 경우, 흑린 시트(230)는 대략 10nm 이하의 두께를 가질 수 있다.

- [0090] 도 3은 또 다른 예시적인 실시예에 따른 흑린-이차원 물질 복합체를 도시한 단면도이다. 이하에서는 전술한 실시예와 다른 점을 중심으로 설명한다.
- [0091] 도 3을 참조하면, 흑린-이차원 물질 복합체(300)는 기관(110), 이차원 물질층(320), 및 기관(110)과 이차원 물질층(320) 사이에 마련되는 흑린 시트(330)를 포함한다. 여기서, 흑린 시트(330)는 기관(110)과 이차원 물질층(320)에 의해 봉지(encapsulation)될 수 있다.
- [0092] 기관(110)으로는 다양한 재료의 기관이 사용될 수 있다. 기관(110)의 상면에 흑린 시트(330)가 마련되어 있다. 흑린 시트(330)에 대해서는 전술하였으므로 이에 대한 상세한 설명은 생략한다. 흑린 시트(330)는 기관(110)의 상면 보다 작은 면적으로 마련될 수 있다. 이에 따라, 기관(110)의 상면 외곽 부분에는 흑린 시트(330)가 마련되지 않을 수 있다.
- [0093] 흑린 시트(330)는 단층 구조 또는 다층 구조를 가질 수 있다. 흑린 시트(330)는 예를 들면, 1층 ~ 50층을 포함할 수 있다. 이 경우, 흑린 시트(330)는 대략 10nm 이하의 두께를 가질 수 있다.
- [0094] 흑린 시트(330)의 상면에는 이차원 물질층(320)이 마련되어 있다. 이차원 물질층(320)은 흑린 시트(330)와는 다른 종류의 이차원 물질을 포함할 수 있다. 제2 이차원 물질층(320)은 예를 들면, 그래핀, h-BN, 또는 TMD를 포함할 수 있다. 이차원 물질층(320)은 전술한 제1 및 제2 이차원 물질층(121,122)과 동일하므로 이에 대한 설명은 생략한다.
- [0095] 이차원 물질층(320)은 흑린 시트(330)의 면적과 같거나 큰 면적으로 마련될 수 있다. 즉, 이차원 물질층(320)은 흑린 시트(330) 전체를 덮도록 마련될 수 있다. 이에 따라, 흑린 시트(330)는 이차원 물질층(320)의 외곽 부분을 돌출하지 않도록 마련될 수 있다. 여기서, 흑린 시트(330) 주위에 있는 기관(110)의 외곽 부분과 이차원 물질층(320)의 외곽 부분은 반데르발스 힘에 의해 서로 결합되도록 마련될 수 있다. 이와 같이, 외곽 부분이 반데르발스 힘에 의해 서로 결합된 기관(110)과 이차원 물질층(320) 사이에 흑린 시트(330)가 마련됨으로써 흑린 시트(330)는 기관(110)과 이차원 물질층(320)에 의해 봉지될 수 있다.
- [0096] 흑린 시트(330)에 마련된 이차원 물질층(320)은 반데르발스 힘에 의해 흑린 시트(330)와 결합되도록 형성될 수 있다. 여기서, 이차원 물질층(320)과 흑린 시트(330) 사이의 간격은 예를 들면 대략 0.8nm 이하가 될 수 있다.
- [0097] 도 4 내지 도 9는 예시적인 실시예에 따른 흑린-이차원 물질 복합체의 제조방법을 설명하기 위한 도면들이다.
- [0098] 도 4를 참조하면, 기관(110)의 상면에 제1 이차원 물질층(121)을 형성한다. 기관(110)으로는 반도체 기관 또는 절연성 기관 등과 같은 다양한 재료의 기관이 사용될 수 있다. 제1 이차원 물질층(121)은 구성 원자들이 평면적으로 결합된 이차원 결정 구조를 가지는 물질을 포함할 수 있다. 예를 들면, 제1 이차원 물질층(121)은 후술하는 흑린 시트(130)와는 다른 종류의 이차원 물질을 포함할 수 있다.
- [0099] 제1 이차원 물질층은 예를 들면, 전사(transfer)를 통해 기관(110)의 상면에 형성될 수 있다. 하지만, 반드시 이에 한정되는 것은 아니다. 이와 같이, 기관(110)의 상면에 제1 이차원 물질층(121)이 형성되면, 제1 이차원 물질층(121)은 기관(110)의 상면과 반데르발스 힘에 의해 결합될 수 있다.
- [0100] 제1 이차원 물질층(121)은 단층 구조 또는 다층 구조를 가질 수 있다. 예를들면, 제1 이차원 물질층(121)은 대략 10nm 이하의 두께를 가질 수 있다. 도 4에는 제1 이차원 물질층(121)이 단층 구조를 가지는 경우가 예시적으로 도시되어 있다. 제1 이차원 물질층(121)이 다층 구조를 가지는 경우에는 적층된 층들은 반데르발스 힘에 의해 서로 결합될 수 있다.
- [0101] 제1 이차원 물질층(121)은 예를 들면, 도전성의 이차원 물질인 그래핀을 포함할 수 있다. 제1 이차원 물질층(121)이 단층 그래핀으로 이루어진 경우에는 제1 이차원 물질층(121)은 대략 0.34nm 정도의 두께를 가질 수 있다. 또한, 제1 이차원 물질층(121)이 다층 그래핀으로 이루어진 경우에는 적층된 층들 사이의 간격은 예를 들면, 대략 0.34nm 정도가 될 수 있다.
- [0102] 제1 이차원 물질층(121)은 예를 들면, 절연성 이차원 물질인 h-BN를 포함할 수 있다. 또한, 제1 이차원 물질층(121)은 예를 들면, 반도체 특성을 가지는 이차원 물질인 TMD를 포함할 수도 있다.
- [0103] 도 5를 참조하면, 제1 이차원 물질층(121)의 상면에 흑린 전구체막(black phosphorus precursor film, 135)을

형성한다. 흑린 전구체막(135)은 예를 들면 대략 10nm 이하의 두께로 형성될 수 있다. 흑린 전구체막(135)은 예를 들면, 백린(WP:white phosphorus), 적린(RP:red phosphorus), PI_3 (phosphorus triiodide) 또는 PCl_3 (phosphorus trichloride)를 포함할 수 있다.

[0104] 예를 들어, 흑린 전구체막(135)은 PI_3 또는 PCl_3 를 포함하는 용액을 제1 이차원 물질층(121)의 상면에 코팅한 다음 이를 환원시켜 적린막을 형성함으로써 형성될 수 있다. 또한, 흑린 전구체막(135)은 백린(WP) 또는 적린(RP)을 이용한 기상 증착(vapor deposition)을 통해서 제1 이차원 물질층(121)의 상면에 형성될 수도 있다.

[0105] 흑린 전구체막(135)은 제1 이차원 물질층(121)의 면적과 같거나 작은 면적으로 제1 이차원 물질층(121)에 마련될 수 있다. 흑린 전구체막(135)은 제1 이차원 물질층(121)의 외곽 부분을 돌출하지 않도록 형성될 수 있다.

[0106] 도 6을 참조하면, 흑린 전구체막(135)에 제2 이차원 물질층(122)을 형성한다. 제2 이차원 물질층(122)은 예를 들면 전사를 통해 흑린 전구체막(135)을 덮도록 제1 이차원 물질층(121) 상에 형성될 수 있다. 제2 이차원 물질층(122)은 제1 이차원 물질층(121)과 마찬가지로 구성 원자들이 평면적으로 결합된 이차원 결정 구조를 가지는 물질을 포함할 수 있다. 제2 이차원 물질층(122)은 흑린 시트(130)와는 다른 종류의 이차원 물질을 포함할 수 있다.

[0107] 제2 이차원 물질층(122)은 단층 구조 또는 다층 구조를 가질 수 있다. 제2 이차원 물질층(122)은 예를 들면, 대략 10nm 이하의 두께를 가질 수 있다. 도 6에는 제2 이차원 물질층(122)이 단층 구조를 가지는 경우가 예시적으로 도시되어 있다. 제2 이차원 물질층(122)이 다층 구조를 가지는 경우에는 적층된 층들은 반데르발스 힘에 의해 서로 결합될 수 있다.

[0108] 제2 이차원 물질층(122)은 예를 들면, 그래핀, h-BN, 또는 TMD를 포함할 수 있다. 제2 이차원 물질층(122)은 제1 이차원 물질층(121)과 동일한 물질을 포함할 수 있다. 예를 들면, 제1 및 제2 이차원 물질층(121, 122)은 모두 그래핀을 포함하거나 또는 모두 h-BN을 포함할 수 있다. 또한, 제2 이차원 물질층(122)은 제1 이차원 물질층(121)과 다른 물질을 포함할 수도 있다. 예를 들면, 제1 이차원 물질층(121)은 h-BN을 포함하고, 제2 이차원 물질층(122)은 그래핀을 포함할 수 있다. 하지만, 이는 단지 예시적인 것이다.

[0109] 제2 이차원 물질층(122)은 흑린 전구체막(135)의 면적과 같거나 큰 면적으로 마련될 수 있다. 즉, 제2 이차원 물질층(122)은 흑린 전구체막(135) 전체를 덮도록 마련될 수 있다. 이에 따라, 흑린 전구체막(135)은 제2 이차원 물질층(121)의 외곽 부분을 돌출하지 않도록 마련될 수 있다. 흑린 전구체막(135) 주위에 있는 제1 이차원 물질층(121)의 외곽 부분과 제2 이차원 물질층(122)의 외곽 부분은 반데르발스 힘에 의해 서로 결합되도록 마련될 수 있다. 이에 따라, 흑린 전구체막(135)은 제1 및 제2 이차원 물질층(121, 122)에 의해 봉지될 수 있다.

[0110] 도 7을 참조하면, 도 6에 도시된 상태에서 흑린 전구체막(135)에 소정 압력 및 소정 온도를 인가하게 되면, 흑린 전구체막(135)이 흑린 시트(130)로 변환(conversion)됨으로써 도 8에 도시된 바와 같이 흑린-이차원 물질 복합체(100)가 형성될 수 있다.

[0111] 흑린 시트(100)는 전술한 바와 같이 인 원자들이 공유결합된 이차원 결정 구조, 구체적으로는, 주름진 벌집 구조를 가지는 이차원 반도체 물질이다. 일반적으로, 흑린은 매우 높은 압력(예를 들면 대략 1.2 GPa)의 조건에서 전구체 물질인 백린 또는 적린을 가열함으로써 형성될 수 있다. 그러나, 본 실시예에는 상압(atmospheric pressure)과 같은 비교적 낮은 압력에서 흑린 시트(130)를 형성할 수 있다.

[0112] 구체적으로, 도 6에 도시된 바와 같이, 흑린 전구체막(135)은 반데르발스 힘에 의해 서로 결합된 제1 및 제2 이차원 물질층(121, 122) 사이에 형성되어 있다. 이 상태에서는, 제1 및 제2 이차원 물질층(121, 122) 사이에 형성된 매우 큰 반데르발스 압력이 흑린 전구체막(135)에 가해질 수 있다. 예를 들어, 제1 및 제2 이차원 물질층(121, 122)이 모두 그래핀으로 이루어진 경우, 제1 및 제2 이차원 물질층(121, 122) 사이에 형성되는 반데르발스 압력은 대략 1.0 GPa 정도로 알려져 있다.

[0113] 이와 같이, 제1 및 제2 이차원 물질층(121, 122)에 의해 형성된 매우 큰 반데르발스 압력이 흑린 전구체막(135)에 가해진 상태에서는 상압과 같은 비교적 낮은 압력에서도 흑린 전구체막(135)을 흑린 시트(130)로 변환시킬 수 있다. 예를 들면, 흑린 전구체막(135)에 가해지는 압력은 예를 들면, 대략 400MPa 이하가 될 수 있다. 구체적인 예로서, 흑린 전구체막(135)에 가해지는 압력은 대략 0.1MPa ~ 200MPa 정도가 될 수 있다.

[0114] 또한, 흑린 전구체막(135)에 가해지는 온도는 예를 들면, 대략 700℃ 이하가 될 수 있다. 구체적인 예로서, 흑린 전구체막(135)에 가해지는 온도는 대략 200℃ ~ 600℃ 정도가 될 수 있다.

- [0115] 이상과 같이, 반데르발스 힘에 의해 서로 결합된 제1 및 제2 이차원 물질층(121,122) 사이에 형성된 흑린 전구체막(135)에 400MPa 이하의 압력 및 700℃ 이하의 온도를 인가하게 되면 흑린 전구체막(135)이 흑린 시트(130)로 변환될 수 있다. 여기서, 흑린 시트(130)는 흑린 전구체막(135)의 두께에 따라 단층 구조 또는 다층 구조를 가질 수 있다.
- [0116] 도 8에는 단층 구조의 흑린 시트(130)가 형성되는 경우가 예시적으로 도시되어 있으며, 경우 흑린 시트는 대략 0.5nm의 두께(t)를 가질 수 있다. 흑린 시트(130)는 다층 구조를 가질 수도 있다. 예를 들어, 흑린 시트(130)는 예를 들면, 1층 ~ 50층을 포함할 수 있다. 이 경우, 흑린 시트(130)는 대략 10nm 이하의 두께를 가질 수 있다.
- [0117] 흑린-이차원 물질 복합체(100)에서, 흑린 시트(130)는 제1 및 제2 이차원 물질층(121,122) 각각과 반데르발스 힘에 의해 결합되어 있다. 이 경우, 제1 및 제2 이차원 물질층(121,122) 각각과 흑린 시트(130) 사이의 간격은 대략 0.8nm 이하가 될 수 있다.
- [0118] 도 9를 참조하면, 전술한 흑린-이차원 물질 복합체(100)를 소정 형태로 패터닝할 수 있다. 도 9에는 제1 및 제2 이차원 물질층(121,122)의 외곽 부분을 제거하여 흑린 시트(130)의 양측을 노출시킨 상태가 도시되어 있다. 도 9에 도시된 구조물은 후술하는 바와 같이 전계효과 트랜지스터(FET) 등과 같은 전자 소자에 적용될 수 있다.
- [0119] 이상과 같이, 본 실시예에서는 제1 및 제2 이차원 물질층(121,122) 사이에 형성되는 반데르발스 압력을 이용하여 상압과 같은 비교적 낮은 압력에서도 흑린 전구체막(135)을 흑린 시트(130)로 변환시킬 수 있다. 따라서, 흑린 시트(130) 및 이를 포함하는 흑린-이차원 물질 복합체(100)를 보다 용이하게 제조할 수 있다.
- [0120] 또한, 흑린 전구체막(135)이 흑린 시트(130)로 변환되는 과정에서, 흑린은 제1 및 제2 이차원 물질층의 결정 방향에 의존하여 에피택셜(epitaxial) 성장될 수 있으므로, 일정한 전하이동도를 갖는 흑린 시트(130)가 형성할 수 있다.
- [0121] 도 10a는 전술한 도 4 내지 도 9에 도시된 방법으로 제조된 흑린-이차원 물질 복합체에 대한 라만 스펙트럼을 도시한 것이다. 도 10b는 도 10a의 A 부분을 확대하여 도시된 것이다. 여기서, 제1 및 제2 이차원 물질층으로는 모두 그래핀이 사용되었다.
- [0122] 도 10a 및 도 10b를 참조하면, D peak, Gpeak 및 2D peak는 그래핀의 존재를 나타내며, A_{1g} peak, B_{2g} peak 및 A_{2g} peak는 흑린(BP)의 존재를 나타낸다. 따라서, 전술한 도 4 내지 도 9에 도시된 방법으로 그래핀들 사이에 흑린 시트가 형성되었음을 알 수 있다.
- [0123] 도 11 내지 도 15는 다른 예시적인 실시예에 따른 흑린-이차원 물질 복합체의 제조방법을 설명하기 위한 도면들이다.
- [0124] 도 11을 참조하면, 기판(100)을 준비한 다음, 기판(110)의 상면에 흑린 전구체막(335)을 형성한다. 기판(110)으로는 다양한 재질의 기판이 사용될 수 있다. 흑린 전구체막(335)은 예를 들면 대략 10nm 이하의 두께로 형성될 수 있다.
- [0125] 흑린 전구체막(335)은 예를 들면, 백린(WP), 적린(RP), PI₃ 또는 PCl₃를 포함할 수 있다. 흑린 전구체막(335)은 예를 들면 PI₃ 또는 PCl₃를 포함하는 용액을 기판(110)의 상면에 코팅한 다음 이를 환원시켜 적린막을 형성함으로써 형성될 수 있다. 또한, 흑린 전구체막(335)은 백린 또는 적린을 이용한 기상 증착을 통해서 기판(110)의 상면에 형성될 수도 있다.
- [0126] 흑린 전구체막(335)은 기판(110)의 상면의 면적과 같거나 작은 면적으로 마련될 수 있다. 기판의 상면(110)의 외곽 부분에는 흑린 전구체막(335)이 형성되지 않을 수 있다.
- [0127] 도 12를 참조하면, 흑린 전구체막(335)에 이차원 물질층(320)을 형성한다. 이차원 물질층(320)은 예를 들면 전사를 통해 흑린 전구체막(335)을 덮도록 기판(110)의 상면에 형성될 수 있다. 이차원 물질층(320)은 후술하는 흑린 시트(330)와는 다른 종류의 이차원 물질을 포함할 수 있다. 이차원 물질층(320)은 예를 들면, 그래핀, h-BN, 또는 TMD를 포함할 수 있다.
- [0128] 이차원 물질층(320)은 단층 구조 또는 다층 구조를 가질 수 있다. 이차원 물질층(320)은 예를 들면, 대략 10nm 이하의 두께를 가질 수 있다. 이차원 물질층(320)이 다층 구조를 가지는 경우에는 적층된 층들은 반데르발스 힘에 의해 서로 결합될 수 있다.
- [0129] 이차원 물질층(320)은 흑린 전구체막(335)의 면적과 같거나 큰 면적으로 마련될 수 있다. 즉, 이차원 물질층

(320)은 흑린 전구체막(335) 전체를 덮도록 마련될 수 있다. 이에 따라, 흑린 전구체막(335)은 이차원 물질층(320)의 외곽 부분을 돌출하지 않도록 마련될 수 있다. 흑린 전구체막(335) 주위에 있는 기관(110)의 외곽 부분과 이차원 물질층(320)의 외곽 부분은 반데르발스 힘에 의해 서로 결합되도록 마련될 수 있다. 이에 따라, 흑린 전구체막(335)은 기관(110)과 이차원 물질층(320)에 의해 봉지될 수 있다.

[0130] 도 13을 참조하면, 도 12에 도시된 상태에서 흑린 전구체막(335)에 소정 압력 및 소정 온도를 인가하게 되면, 흑린 전구체막(335)은 흑린 시트(330)로 변환됨으로써 도 14에 도시된 바와 같이 흑린-이차원 물질 복합체(300)가 형성될 수 있다.

[0131] 전술한 바와 같이, 흑린 전구체막(335)은 반데르발스 힘에 의해 서로 결합된 기관(110)과 이차원 물질층(320) 사이에 형성되어 있다. 이 상태에서는, 기관(110)과 이차원 물질층(320) 사이에 형성된 매우 큰 반데르발스 압력이 흑린 전구체막(335)에 가해질 수 있다. 이와 같이, 기관(110)과 이차원 물질층(320)에 의해 형성된 매우 큰 반데르발스 압력이 흑린 전구체막(335)에 가해진 상태에서는 상압과 같은 비교적 낮은 압력에서도 흑린 전구체막(335)을 흑린 시트(330)로 변환시킬 수 있다. 예를 들면, 흑린 전구체막(335)에 가해지는 압력은 예를 들면, 대략 400MPa 이하가 될 수 있다. 구체적인 예로서, 흑린 전구체막(335)에 가해지는 압력은 대략 0.1MPa ~ 200MPa 정도가 될 수 있다.

[0132] 흑린 전구체막(335)에 가해지는 온도는 예를 들면, 대략 700℃ 이하가 될 수 있다. 구체적인 예로서, 흑린 전구체막(335)에 가해지는 온도는 대략 200℃ ~ 600℃ 정도가 될 수 있다.

[0133] 흑린 시트(330)는 흑린 전구체막(335)의 두께에 따라 흑린 시트(330)는 단층 구조 또는 다층 구조를 가질 수 있다. 예를 들어, 흑린 시트(330)는 예를 들면, 1층 ~ 50층을 포함할 수 있다. 이 경우, 흑린 시트(330)는 대략 10nm 이하의 두께를 가질 수 있다. 흑린-이차원 물질 복합체(300)에서, 흑린 시트(330)는 이차원 물질층(320)과 반데르발스 힘에 의해 결합되어 있다. 이 경우, 흑린 시트(330)와 이차원 물질층(320) 사이의 간격은 대략 0.8nm 이하가 될 수 있다.

[0134] 도 15를 참조하면, 전술한 흑린-이차원 물질 복합체(300)를 소정 형태로 패터닝할 수 있다. 도 15에는 이차원 물질층(320)의 외곽 부분을 제거하여 흑린 시트(330)의 양측을 노출시킨 상태가 도시되어 있다. 도 15에 도시된 구조물은 후술하는 바와 같이 전계효과 트랜지스터(FET) 등과 같은 전자 소자에 적용될 수 있다.

[0135] 이상과 같이, 본 실시예에서는 기관(110)과 이차원 물질층(320) 사이에 형성되는 반데르발스 압력을 이용함으로써 상압과 같은 비교적 낮은 압력에서도 흑린 시트를 형성할 수 있다.

[0136] 이상에서 설명된 흑린-이차원 물질 복합체(100,300)는 예를 들면, 전계효과 트랜지스터(FET: Field Effect Transistor) 또는 포토디텍터(photodetector) 등과 같은 다양한 전자 소자에 적용될 수 있다.

[0137] 도 16은 예시적인 실시예에 따른 전자 소자(구체적으로, 전계효과 트랜지스터(FET))를 도시한 것이다.

[0138] 도 16을 참조하면, 전자 소자(400)는 흑린-이차원 복합체와, 흑린-이차원 복합체의 양측에 각각 마련되는 제1 및 제2 전극(441,442)과, 흑린-이차원 복합체의 상부에 마련되는 제3 전극(450)을 포함한다.

[0139] 기관(410)의 상면에는 흑린-이차원 복합체가 마련되어 있다. 여기서, 기관(410)으로는 절연성 물질을 포함하는 기관이 사용될 수 있다. 흑린-이차원 복합체는 전술한 도 4 내지 도 9에 도시된 방법에 의해 제작될 수 있다.

[0140] 구체적으로, 흑린-이차원 구조체는 흑린 시트(430)와, 흑린 시트(430)의 상면에 마련되는 제1 이차원 물질층(422)과, 흑린 시트(430)의 하면에 마련되는 제2 이차원 물질층(421)을 포함한다. 여기서, 흑린 시트(430)는 그 양측이 제1 및 제2 이차원 물질층(422,421)에 덮혀 있지 않고 오픈되어 있다.

[0141] 흑린 시트(430)에 대해서는 전술하였으므로 이에 대한 상세한 설명은 생략한다. 흑린 시트(430)는 단층 구조 또는 다층 구조를 가질 수 있다. 흑린 시트(430)는 예를 들면, 1층 ~ 50층을 포함할 수 있다. 이 경우, 흑린 시트(430)는 대략 10nm 이하의 두께를 가질 수 있다.

[0142] 흑린 시트(430)의 상면 및 하면에는 각각 제1 및 제2 이차원 물질층(422,421)이 마련되어 있다. 제1 및 제2 이차원 물질층(422,421)은 흑린 시트(430)와는 다른 종류의 이차원 물질을 포함할 수 있다. 예를 들면, 제1 및 제2 이차원 물질층(422,421)은 h-BN 과 같은 절연성 이차원 물질을 포함할 수 있다.

[0143] 제1 및 제2 이차원 물질층(422,421) 각각은 단층 구조 또는 다층 구조를 가질 수 있다. 제1 및 제2 이차원 물질층(422,421) 각각은 예를 들면, 대략 10nm 이하의 두께를 가질 수 있다.

- [0144] 제1 및 제2 이차원 물질층(422,421) 각각은 흑린 시트(430)와 반데르발스 힘에 의해 결합되어 있다. 여기서, 제1 및 제2 이차원 물질층(422,421) 각각과 흑린 시트(430) 사이의 간격은 예를 들면 대략 0.8nm 이하가 될 수 있다.
- [0145] 제1 및 제2 전극(441,442)은 흑린-이차원 물질 복합체의 양측에 마련되어 있다. 제1 및 제2 전극(441,442)은 흑린 시트(430)와 에지 컨택(edge contact)을 형성하도록 마련될 수 있다. 구체적으로, 흑린 시트(430)는 그 양측 단부가 제1 및 제2 이차원 물질층(422,421)에 덮혀 있지 않고 오픈되어 있으며, 이러한 오픈된 흑린 시트(430)의 양측 단부가 제1 및 제2 전극(441,442)과 전기적으로 접촉하도록 구성되어 있다.
- [0146] 제1 및 제2 전극(441,442)은 우수한 도전성을 가지는 물질을 포함할 수 있다. 제1 및 제2 전극(441,442)은 각각 소스 전극(source electrode) 및 드레인 전극(drain electrode)가 될 수 있다. 소스 전극인 제1 전극(441)과 드레인 전극인 제2 전극(442) 사이에 마련된 흑린 시트(430)는 채널의 역할을 수행할 수 있다.
- [0147] 제1 및 제2 전극(441,442) 사이에서 제1 이차원 물질층(422)의 상부에는 제3 전극(450)이 마련될 수 있다. 제3 전극(450)은 게이트 전극이 될 수 있다. 그리고, 제1 이차원 물질층(422)과 제3 전극(450) 사이에는 절연층(455)이 마련될 수 있다. 절연층(455)은 게이트 절연층이 될 수 있다.
- [0148] 도 17은 다른 예시적인 실시예에 따른 전자 소자를 도시한 것이다. 도 17에 도시된 전자 소자(500)는 흑린 시트(430)의 하면에 이차원 물질층이 마련되어 있지 않다는 점을 제외하면 도 16에 도시된 전자 소자(400)와 동일하다.
- [0149] 도 17를 참조하면, 흑린-이차원 물질 복합체는 흑린 시트(430)와 이 흑린 시트(430)의 상면에 마련되는 이차원 물질층(520)을 포함한다. 이차원 물질층(520)은 h-BN 과 같은 절연성 이차원 물질을 포함할 수 있다. 흑린-이차원 복합체는 예를 들면, 전술한 도 11 내지 도 15에 도시된 방법에 의해 제작될 수 있다.
- [0150] 도 18은 또 다른 예시적인 실시예에 따른 전자 소자를 도시한 것이다.
- [0151] 도 18을 참조하면, 전자 소자(600)는 흑린-이차원 복합체와, 흑린-이차원 복합체의 양측에 각각 마련되는 제1 및 제2 전극(641,642)과, 흑린-이차원 복합체의 상부에 마련되는 제3 전극(650)을 포함한다.
- [0152] 흑린-이차원 구조체는 흑린 시트(630)와, 흑린 시트(630)의 상면에 마련되는 제1 이차원 물질층(622)과, 흑린 시트(630)의 하면에 마련되는 제2 이차원 물질층(621)을 포함한다. 제1 및 제2 이차원 물질층(622,621)은 흑린 시트(630)와는 다른 종류의 이차원 물질을 포함할 수 있다. 예를 들면, 제1 및 제2 이차원 물질층(622,621)은 h-BN 과 같은 절연성의 이차원 물질을 포함할 수 있다.
- [0153] 제1 및 제2 전극(641,642)은 흑린-이차원 물질 복합체의 양측에 마련되어 있다. 제1 및 제2 전극(641,642)은 흑린-이차원 물질 복합체와 평면 컨택(planar contact)을 형성하도록 마련될 수 있다. 구체적으로, 제1 및 제2 전극(641,642)은 제1 이차원 물질층(622)의 양측 상면에 각각 접촉하도록 마련될 수 있다. 제1 및 제2 전극(641,642)은 각각 소스 전극 및 드레인 전극이 될 수 있다. 흑린 시트(630)는 채널의 역할을 수행할 수 있다. 이 경우, 제1 전극(441)과 흑린 시트(630) 사이 및 제2 전극(642)과 흑린 시트(630) 사이에는 터널링 효과(tunneling effect)에 의해 전하가 이동할 수 있다.
- [0154] 제1 및 제2 전극(641,642) 사이에 있는 제1 이차원 물질층(622)의 상부에는 제3 전극(650)이 마련될 수 있으며, 제1 이차원 물질층(622)과 제3 전극(650) 사이에는 절연층(655)이 마련될 수 있다. 제3 전극(650)은 게이트 전극이 될 수 있으며, 절연층(655)은 게이트 절연층이 될 수 있다.
- [0155] 도 19는 또 다른 예시적인 실시예에 따른 전자 소자를 도시한 것이다. 도 19에 도시된 전자 소자(700)는 흑린 시트(630)의 하면에 이차원 물질층이 마련되어 있지 않다는 점을 제외하면 도 18에 도시된 전자 소자(600)와 동일하다.
- [0156] 도 19를 참조하면, 흑린-이차원 물질 복합체는 흑린 시트(630)와 이 흑린 시트(630)의 상면에 마련되는 이차원 물질층(720)을 포함한다. 이차원 물질층(720)은 h-BN 과 같은 절연성 이차원 물질을 포함할 수 있다.
- [0157] 도 20은 또 다른 예시적인 실시예에 따른 전자 소자를 도시한 것이다.
- [0158] 도 20을 참조하면, 전자 소자(800)는 흑린-이차원 복합체와, 흑린-이차원 복합체의 양측에 각각 마련되는 제1 및 제2 전극(841,842)과, 흑린-이차원 복합체의 상부에 마련되는 제3 전극(850)을 포함한다.
- [0159] 흑린-이차원 구조체는 흑린 시트(830)와, 흑린 시트(830)의 상면에 마련되는 제1 이차원 물질층(822)과, 흑린

시트(830)의 하면에 마련되는 제2 이차원 물질층(821)을 포함한다. 흑린 시트(830)의 상면에 마련되는 제1 이차원 물질층(822)은 플루오린화 그래핀(fluorinated graphene, 822b)과 이 플루오린화 그래핀(822b)의 양측 각각에 마련된 그래핀(822a)을 포함할 수 있다. 여기서, 플루오린화 그래핀(822b)은 절연성 물질로서, 예를 들면 XeF_2 , SF_6 등을 이용하여 그래핀(822a)을 플루오린화(fluorination) 시킴으로써 형성될 수 있다. 흑린 시트(830)의 하면에 마련되는 제2 이차원 물질층(821)은 h-BN 과 같은 절연성 이차원 물질을 포함할 수 있다.

[0160] 제1 및 제2 전극(841,842)은 흑린-이차원 물질 복합체의 양측에 마련되어 있다. 제1 및 제2 전극(841,842)은 흑린-이차원 물질 복합체와 평면 접촉(planar contact)을 형성하도록 마련될 수 있다. 구체적으로, 제1 및 제2 전극(841,842)은 제1 이차원 물질층(822) 중 플루오린화 그래핀(822b)의 양측 각각에 마련된 그래핀(822a)과 접촉하도록 형성될 수 있다.

[0161] 제1 및 제2 전극(841,842)은 각각 소스 전극 및 드레인 전극이 될 수 있다. 흑린 시트는 채널의 역할을 수행할 수 있다. 제1 및 제2 전극(841,842) 사이에서 제1 이차원 물질층(822)의 상부에는 제3 전극(850)이 마련될 수 있으며, 제1 이차원 물질층(822)과 제3 전극(850) 사이에는 절연층(855)이 마련될 수 있다. 제3 전극(850)은 게이트 전극이 될 수 있으며, 절연층(855)은 게이트 절연층이 될 수 있다.

[0162] 도 21은 또 다른 예시적인 실시예에 따른 전자 소자를 도시한 것이다. 도 21에 도시된 전자 소자(900)는 흑린 시트(830)의 하면에 이차원 물질층이 마련되어 있지 않다는 점을 제외하면 도 20에 도시된 전자 소자(800)와 동일하다.

[0163] 도 21을 참조하면, 흑린-이차원 물질 복합체는 흑린 시트(830)와 이 흑린 시트(830)의 상면에 마련되는 이차원 물질층(920)을 포함한다. 여기서, 이차원 물질층(920)은 플루오린화 그래핀(920b)과 이 플루오린화 그래핀(920b)의 양측 각각에 마련된 그래핀(920a)을 포함할 수 있다.

[0164] 이상의 예시적인 실시예들에 의하면, 제1 및 제2 이차원 물질층 사이 또는 기판과 이차원 물질층 사이에 형성되는 큰 반데르발스 압력을 이용하여 상압과 같은 비교적 낮은 압력에서도 흑린 시트 및 흑린-이차원 물질 복합체를 용이하게 형성할 수 있다.

[0165] 또한, 흑린 시트가 제1 및 제2 이차원 물질층에 의해 봉지됨으로써 흑린 시트는 산화 등과 같은 외부 영향으로부터 보호될 수 있다. 이러한 흑린 시트는 반도체 특성, 높은 전하이동도 및 높은 온/오프 전류비를 가지고 있으므로 이를 포함하는 흑린-이차원 복합체는 전계 효과 트랜지스터(FET) 또는 포토디텍터 등과 같은 다양한 전자 소자에 적용될 수 있다. 이상에서 실시예가 설명되었으나, 이는 예시적인 것에 불과하며, 당해 분야에서 통상적 지식을 가진 자라면 이로부터 다양한 변형이 가능하다.

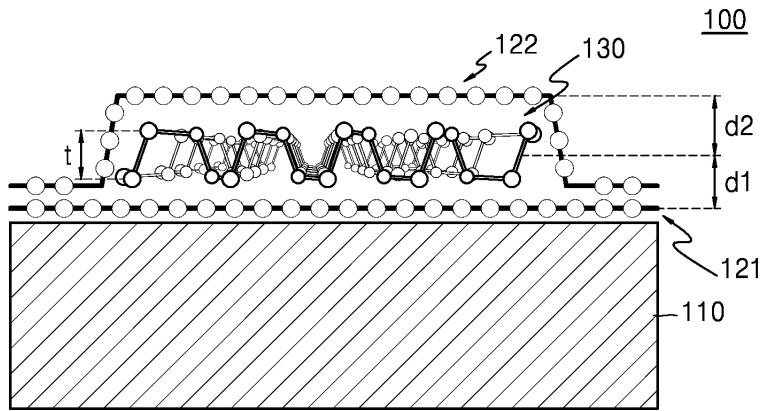
부호의 설명

[0166] 100,200,300.. 흑린-이차원 물질 복합체
110,410.. 기판
121,221,422,622,822,.. 제1 이차원 물질층
122,222,421,621,821.. 제2 이차원 물질층
130,230,330,430,630,830.. 흑린 시트
135,335.. 흑린 전구체막
320,520,720,920.. 이차원 물질층
400,500,600,700,800,900.. 전자 소자
441,641,841.. 제1 전극
442,642,842.. 제2 전극
450,650,850.. 제3 전극
455,655,855.. 절연층
822a,920a.. 그래핀

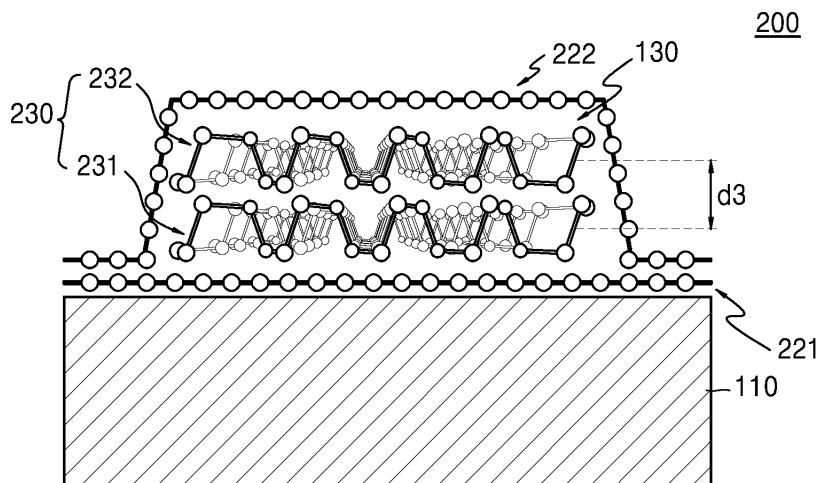
822b, 920b... 플루오린화 그래핀

도면

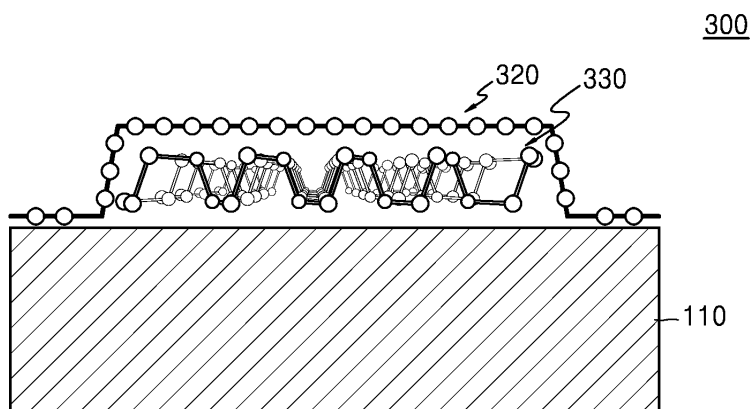
도면1



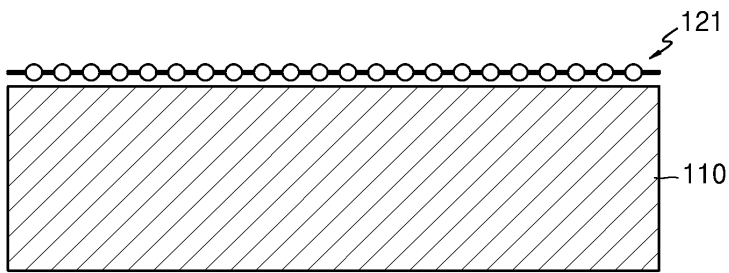
도면2



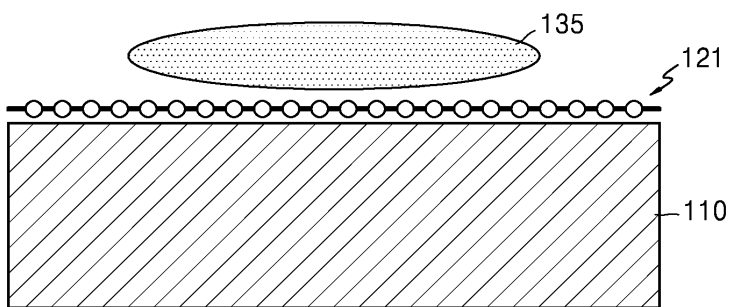
도면3



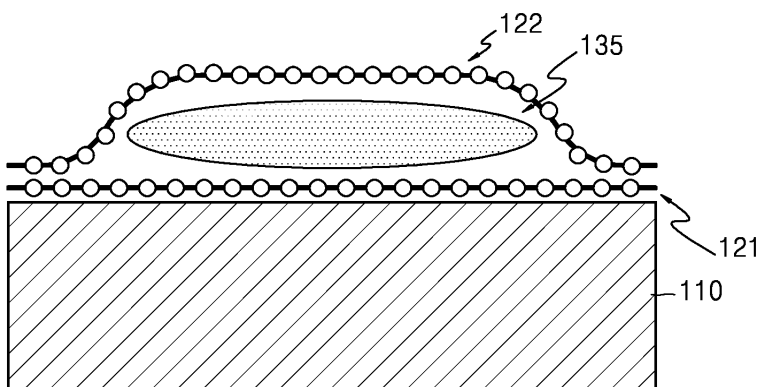
도면4



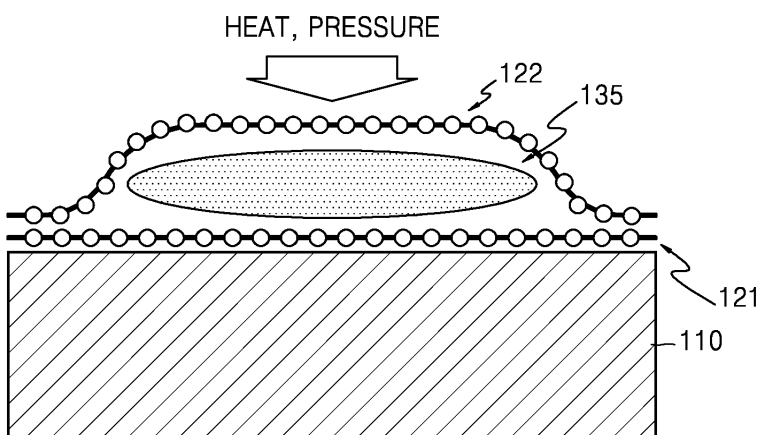
도면5



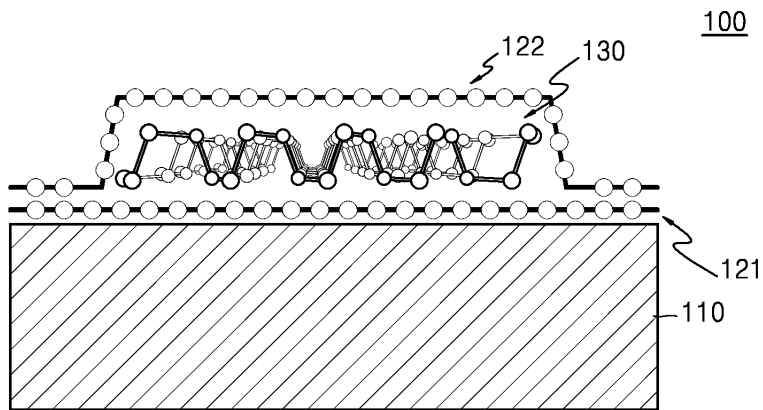
도면6



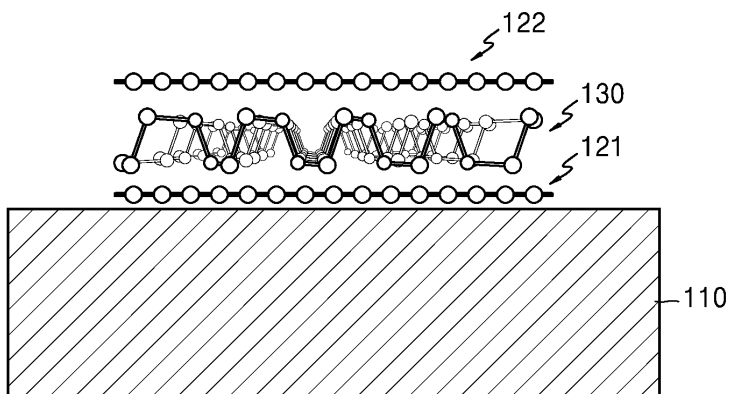
도면7



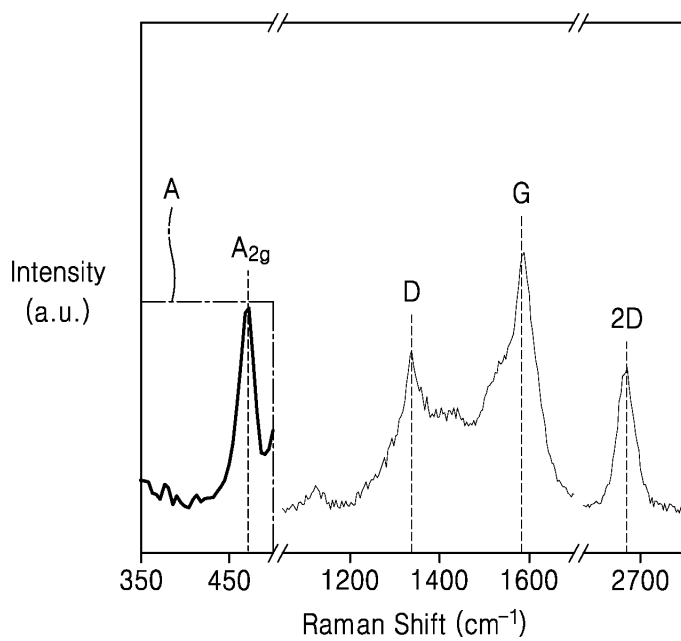
도면8



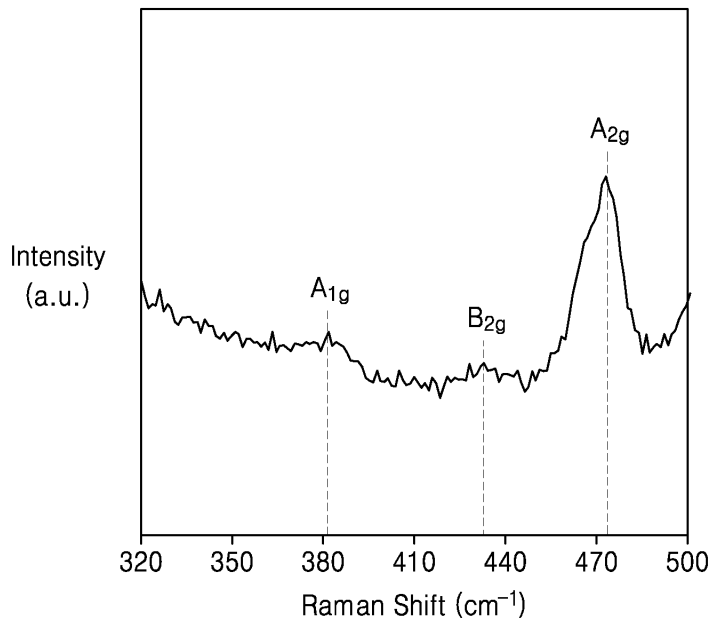
도면9



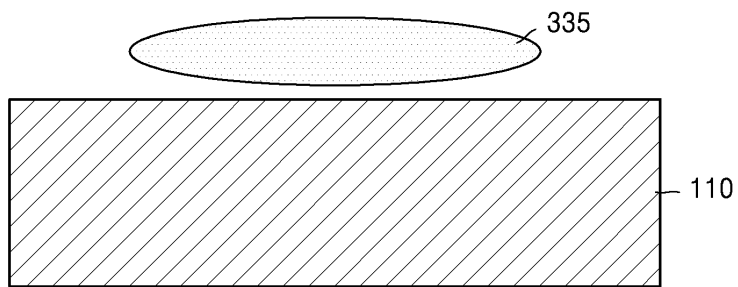
도면10a



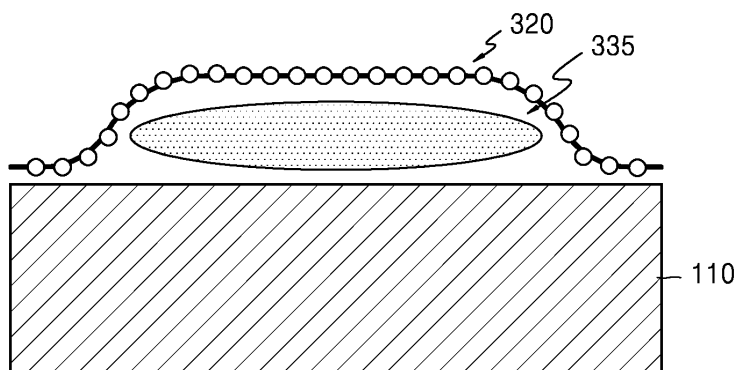
도면10b



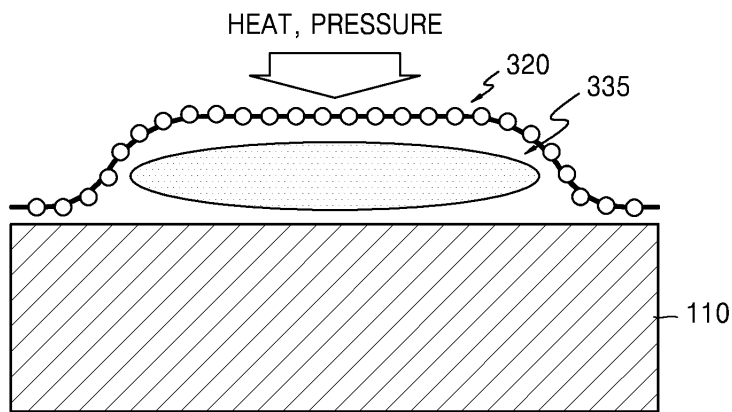
도면11



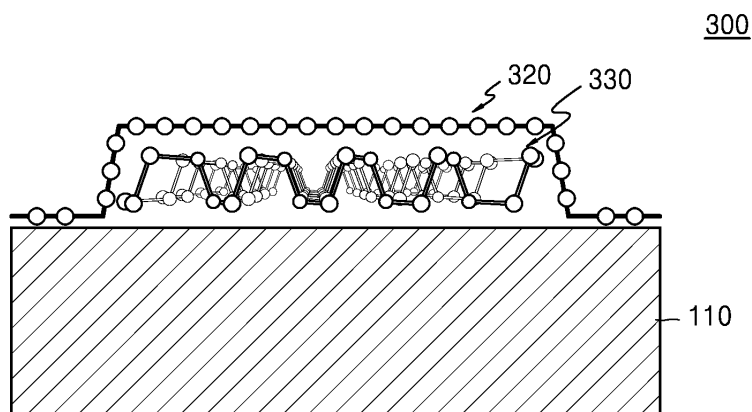
도면12



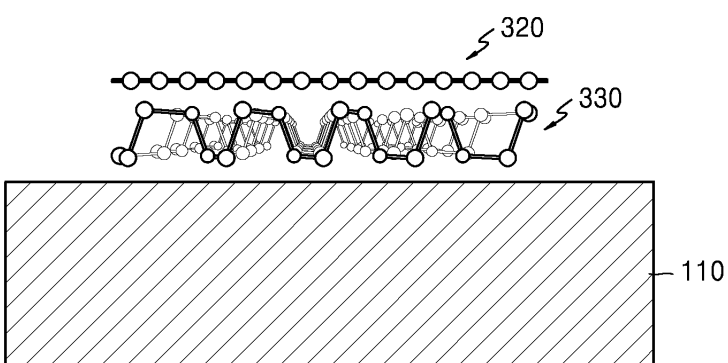
도면13



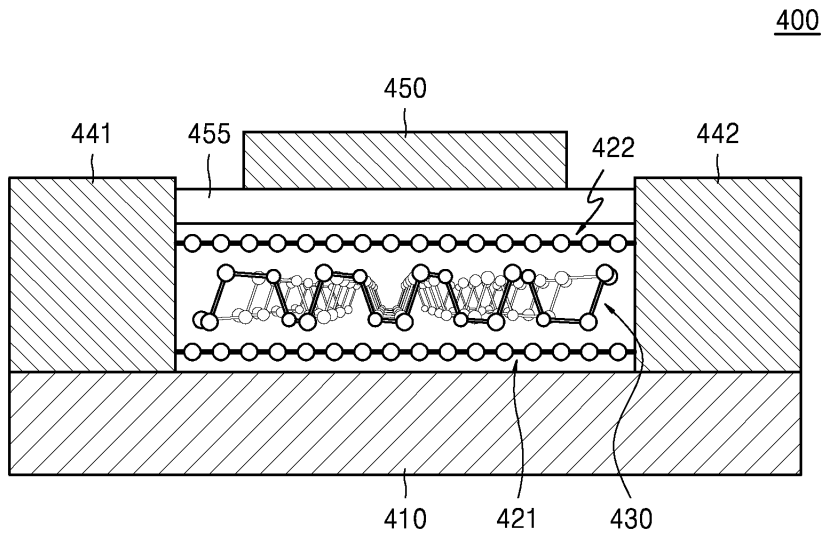
도면14



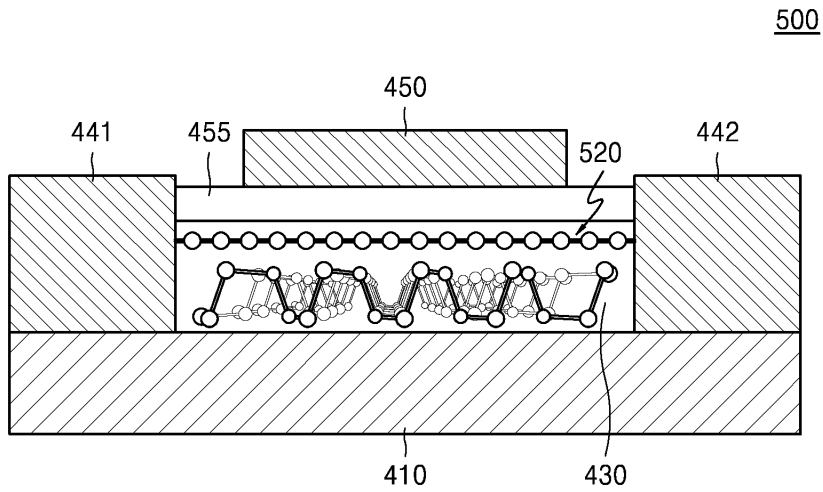
도면15



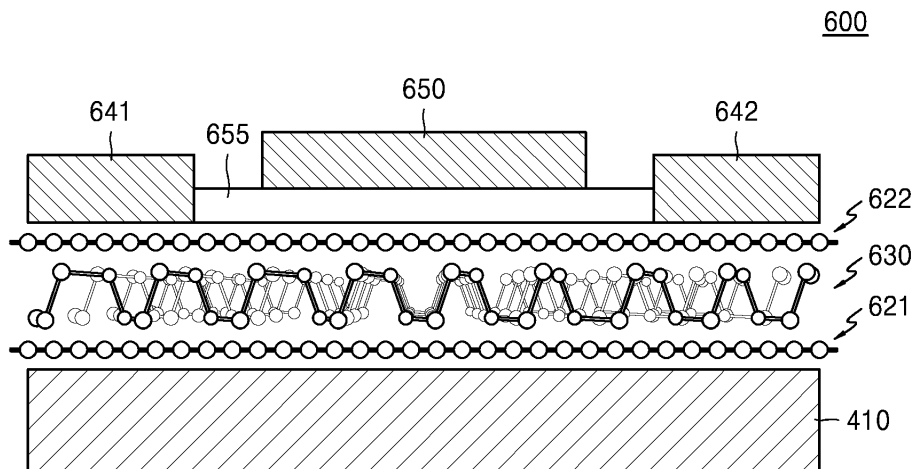
도면16



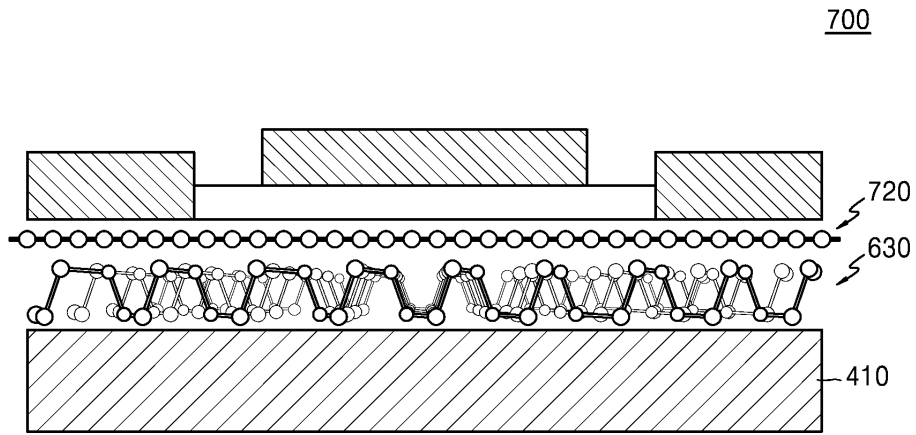
도면17



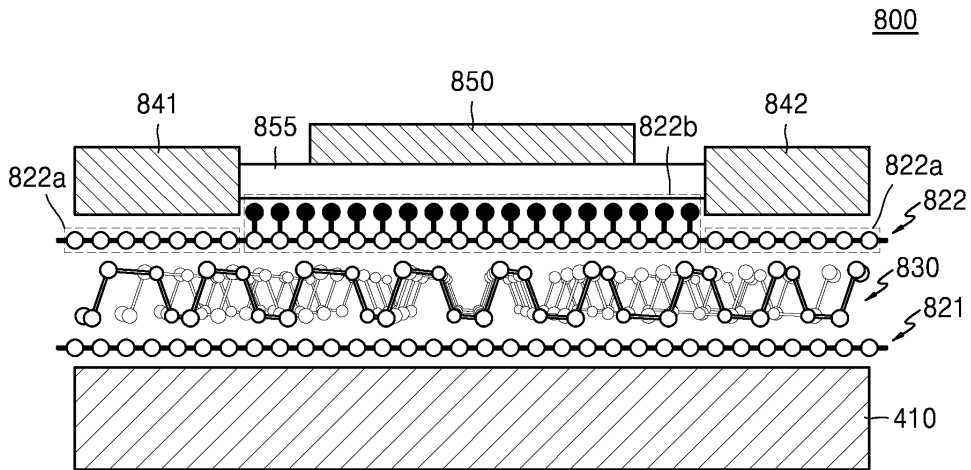
도면18



도면19



도면20



도면21

