



(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 등록특허공보(B1)

(45) 공고일자 2017년06월15일
(11) 등록번호 10-1741338
(24) 등록일자 2017년05월23일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
H01L 31/00 (2006.01) C01B 21/082 (2006.01)
C01B 25/00 (2006.01)
(52) CPC특허분류
H01L 31/00 (2013.01)
C01B 21/0821 (2013.01)
(21) 출원번호 10-2015-0184951
(22) 출원일자 2015년12월23일
심사청구일자 2015년12월23일
(56) 선행기술조사문헌
KR1020130136280 A
US08378209 B2
US20150122321 A1
Cai et al.: "The Electronic Properties of Phosphorene/Graphene and Phosphorene/Hexagonal Boron Nitride Heterostructures", The Journal of Physical Chemistry C, 2015 (2015.05.27.)*
*는 심사관에 의하여 인용된 문헌

(73) 특허권자
부경대학교 산학협력단
부산광역시 남구 신선로 365 (용당동, 부경대학교)
(72) 발명자
홍지상
부산광역시 남구 용소로 45, 물리학과(대연3동, 부경대학교)
타오 후
부산광역시 남구 용소로 45, 물리학과(대연3동, 부경대학교)
(74) 대리인
남건필, 박종수, 차상윤

전체 청구항 수 : 총 4 항

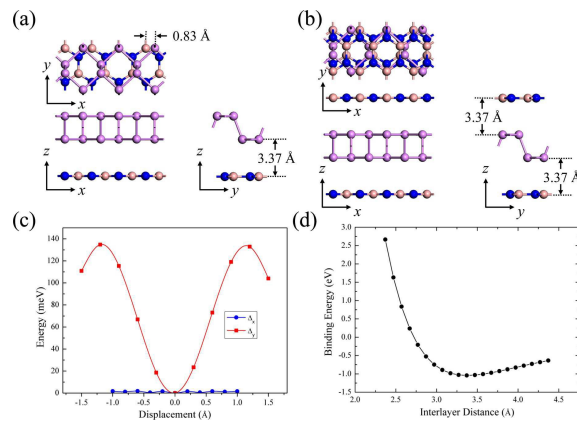
심사관 : 이규재

(54) 발명의 명칭 포스포린 및 보론나이트라이드의 헤테로구조 포스포린 시트

(57) 요약

본 발명은 포스포린의 산화가 억제되면서 전기적 및 광학적 이방성 특성(anisotropic properties)이 유지 또는 향상된 포스포린 층; 및 상기 포스포린 층의 일면 또는 양면에 증착된 헥사고날 보론 나이트라이드(hexagonal boron nitride: h-BN) 층을 포함하는, 포스포린 시트에 관한 것이다.

대표도 - 도1



(52) CPC특허분류

C01B 25/00 (2013.01)

이 발명을 지원한 국가연구개발사업

과제고유번호 2013R1A1AA2006071

부처명 교육부

연구관리전문기관 한국연구재단

연구사업명 기초연구사업 일반연구자사업

연구과제명 적층구조 물질을 이용한 새로운 스핀트로닉스 연구

기 여 율 1/1

주관기관 부경대학교

연구기간 2015.06.01 ~ 2016.05.31

공지예외적용 : 있음

명세서

청구범위

청구항 1

포스포린 층; 및

상기 포스포린 층의 일면에 2층 이상 및 타면에 1층 이상 증착된 헥사고날 보론 나이트라이드(hexagonal boron nitride: h-BN) 층을 포함하고,

상기 포스포린 층은 무결점 포스포린 층에 비해 증가된 밴드갭을 가짐을 특징으로 하는,

포스포린 시트.

청구항 2

삭제

청구항 3

제1항에 있어서,

상기 포스포린 층 및 상기 헥사고날 보론 나이트라이드의 층간 결합은 반데르발스 상호작용에 의해 결합됨을 특징으로 하는,

포스포린 시트.

청구항 4

삭제

청구항 5

삭제

청구항 6

제1항에 있어서,

상기 포스포린 시트는 포스포린의 산화억제 특성을 가지는,

포스포린 시트.

청구항 7

제1항의 포스포린 시트를 포함하는 광-전자 소자.

발명의 설명

기술 분야

[0001] 본 발명은 포스포린의 산화가 억제되면서 전기적 및 광학적 이방성 특성(anisotropic properties)이 유지 또는 향상된 헤테로 구조 포스포린 시트에 관한 것이다.

배경 기술

[0002] 포스포린은 이의 특별한 물리적 특성 때문에 많은 주목을 받고 있다. 포스포린은 흑린의 단일층이다. 여러 타입의 2D 물질 중, 포스포린은 Γ -지점에서의 타고난 직접 천이형 밴드갭(intrinsic direct band gap)을 가지기 때문에 특별히 주목을 받고 있다. 그외에, 몇 층으로 이뤄진 포스포린은 $300\text{-}1000\text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ 의 높은 전하 이동성을 가진다. 이 값은 그래핀의 것보다는 작지만, 포스포린의 이동성은 다른 2D 물질의 것보다는 훨씬 큰 값이다. 추

가로, 포스포린은 지그재그 및 압축 방향에 대한 이방성 전기적 그리고 광학적 특성을 가진다. 이 큰 이동성, 직접 천이형 밴드갭, 이등성 전기적 및 광학적 특성 때문에, 포스포린은 여러 목적으로 그래핀보다 우수할 수 있다.

[0003] 포스포린에서 발견된 이러한 유망한 물리적 특성에도 불구하고, 인은 주위 환경에서 산화에 열화되는 문제를 가진 것으로 보고되어 있다. 따라서, 포스포린의 타고난 물리적 특성을 보호하는 방법을 찾는 것은 중요한 문제이다. 이에 본 발명자는 포스포린 층을 캡핑 또는 캡슐화함에 의해 달성될 수 있음을 발견하였다.

[0004] 일반적으로 2D 물질은 약한 반데르발스 층간 상호 작용(interlayer interaction)을 가지고 있어서 거의 몇층 없는 구조를 얻을 수 있다. 실제로 제조 기술의 발전으로, 상이한 2D 재료를 2D 헤테로구조로 인공적으로 통합하여 특정 두께 및 순서의 층을 형성할 수 있다. 예를 들어, 그래핀/포스포린 이중층, 포스포린/MoS₂ 단일층의 p-n 다이오드, 포스포린/TiO₂의 하이브리드 광촉매, 그래핀/h-BN의 포스포린 기체 전계 효과 트랜지스터는 개발될 수 있다. 실제로, 공기에 안정한 h-BN 엔캡슐된 포스포린 장치는 입증되었다. 그러나 포스포린 특성에 캡슐화 또는 캡핑을 위한 h-BN 층의 효과의 철저한 연구는 여전히 부족하다.

발명의 내용

해결하려는 과제

[0005] 본 발명은 포스포린의 산화를 억제하면서 전기적 그리고 광학적 이방성 특성(anisotropic properties)이 유지 또는 향상시킴을 목적으로 한다.

과제의 해결 수단

[0006] 본 발명은 포스포린 층; 및 상기 포스포린 층의 일면 또는 양면에 증착된 헥사고날 보론 나이트라이드(hexagonal boron nitride: h-BN) 층을 포함하는, 포스포린 시트를 제공한다. 여기서, 본 발명은 포스포린 층의 양면에 증착된 헥사고날 보론 나이트라이드(hexagonal boron nitride: h-BN) 층을 포함하는 포스포린 시트를 제공한다.

[0007] 상기 포스포린 층 및 상기 헥사고날 보론 나이트라이드의 층간 결합은 반데르발스 상호작용에 의해 결합됨을 특징으로 한다.

[0008] 상기 포스포린 시트는 무결점 포스포린 층에 비해 증가된 밴드갭을 가짐을 특징으로 한다.

[0009] 상기 포스포린 시트의 일면에 2층 이상 및 타면에 2층 이상 증착된 헥사고날 보론 나이트라이드(hexagonal boron nitride: h-BN) 층을 포함한다.

[0010] 상기 포스포린 시트는 포스포린의 산화억제 특성을 가진다.

[0011] 본 발명의 포스포린 시트는 광-전자 소자로 사용될 수 있다.

발명의 효과

[0012] 무결점 포스포린의 밴드갭보다 본 발명의 포스포린/BN(1ML) 헤테로 구조체는 0.15eV 증가된 밴드갭을 보여주었다. 또한 본 발명의 다른 형태인 BN(1ML)/포스포린/BN(1ML)의 경우, 0.31eV의 증가된 밴드갭을 보여주었다. h-BN의 두께가 4ML 이상부터는 더 이상 밴드갭의 증가를 보여주지 않았다. 놀랍게도 이방성 유효 질량 및 광학 특성은 본 발명의 헤테로 구조체에서 유지된다.

도면의 간단한 설명

[0013] 도 1에서 (a)는 h-BN/포스포린 이중층의 세 가지 기초 직각도면(orthographic views)이다. 0.83 Å는 x 방향에 따른 P 및 B 원소 사이의 거리이다. 층간 거리는 3.37 Å이다. (b)는 BN/포스포린/BN 삼중층의 세 가지 기초 직각도면이다. (c)는 x (Δ_x) 및 y (Δ_y) 방향에서 상대적 변위에 따른 일련의 구조들의 에너지 차이를 보여준다. (d)는 층간 거리에 따른 BN/포스포린 이중층의 결합 에너지를 보여준다.

도 2는 계산된 밴드 구조를 보여주며, (a)는 무결점 단층 포스포린, (b)는 BN/포스포린 이중층 및 (c)는 BN/포스포린/BN 삼중층에 대한 것이다. 검은색 및 붉은 색 곡선은 각각 PBE 및 HSE06 결과를 나타낸다.

도 3에서 (a)는 유리된(isolated) 포스포린, 유리된 h-BN, BN/포스포린 이중층 및 BN/포스포린/BN 삼중층 시스

템의 계산된(HSE06 방법) 총 밀도 상태(total density of states (TDOS))이다.

도 4는 (a) 압축어 (y) 방향 및 (b) 지그재그 (x) 방향에 따른 편광된 입사광에 대한 포스포린 단층 및 헤테로 구조에서 주파수-의존 유전 함수의 이미지 부분이다. 점선은 제1 흡수 피크의 탄젠트 라인이고; 이들은 해당 케 이스에 대한 밴드 가장자리의 위치를 제공한다. 외삽된 값은 작은 박스에 도시되어 있다. (b)의 삽도는 2.7 내 지 3.5 eV의 에너지 범위 내에서 줄인 그림이다. 압축어 편광된 입사광에 있어서, 밴드 가장자리의 위치는 유리 된 포스포린, 포스포린/BN(1ML), BN(1ML)/포스포린/BN-(1ML), BN(1ML)/포스포린/BN(2ML), 및 BN(2ML)/포스포린 /BN(2ML) 시스템의 경우에 대해 각각 1.50, 1.65, 1.82, 1.82, 및 1.82 eV 이다. 지그재그 편광 입사광에 있어 서, 해당 시스템의 위치는 3.14, 2.96, 2.96, 2.82, 및 2.79 eV이다.

도 5는 (a) 압축어 (y) 방향 및 (b) 지그재그 (x) 방향에 따라 편광된 입사광에 대한 포스포린 단층 및 헤테로 구조의 광 흡수 스펙트럼이다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

- [0014] 이하, 첨부한 도면을 참조하여 본 발명의 실시예에 대해 상세히 설명한다. 본 발명은 다양한 변경을 가할 수 있 고 여러 가지 형태를 가질 수 있는바, 특정 실시예들을 도면에 예시하고 본문에 상세하게 설명하고자 한다. 그 러나 이는 본 발명을 특정한 개시 형태에 대해 한정하려는 것이 아니며, 본 발명의 사상 및 기술 범위에 포함되 는 모든 변경, 균등물 내지 대체물을 포함하는 것으로 이해되어야 한다. 각 도면을 설명하면서 유사한 참조부호 를 유사한 구성요소에 대해 사용하였다.
- [0015] 본 출원에서 사용한 용어는 단지 특정한 실시 예를 설명하기 위해 사용된 것으로서 본 발명을 한정하려는 의도 가 아니다. 단수의 표현은 문맥상 명백하게 다르게 뜻하지 않는 한, 복수의 표현을 포함한다. 본 출원에서, "포 함하다" 또는 "가지다" 등의 용어는 명세서 상에 기재된 특징, 단계, 동작, 구성요소, 부분품 또는 이들을 조합 한 것이 존재함을 지정하려는 것이지, 하나 또는 그 이상의 다른 특징들이나 단계, 동작, 구성요소, 부분품 또 는 이들을 조합한 것들의 존재 또는 부가 가능성을 미리 배제하지 않는 것으로 이해되어야 한다.
- [0016] 다르게 정의되지 않는 한, 기술적이거나 과학적인 용어를 포함해서 여기서 사용되는 모든 용어들은 본 발명이 속하는 기술 분야에서 통상의 지식을 가진 자에 의해 일반적으로 이해되는 것과 동일한 의미를 가지고 있다. 일 반적으로 사용되는 사전에 정의되어 있는 것과 같은 용어들은 관련 기술의 문맥 상 가지는 의미와 일치하는 의 미를 가지는 것으로 해석되어야 하며, 본 출원에서 명백하게 정의하지 않는 한, 이상적이거나 과도하게 형식적 인 의미로 해석되지 않는다.
- [0017] 본 발명에서 사용한 모든 계산은 VASP(Vienna ab initio simulation package)을 사용하여 수행하였다. PBE(Perdew-Burk-Ernzerhof)의 일반 구배 근사법(generalized gradient approximation)을 이용하였다. 원자가 전자를 분명히 처리하였고 이온성 코어와의 이의 상호작용을 PAW(projector augmented wave) 의사 포텐셜법에 의해 묘사하였다. 층 구조 물질의 층간 상호 작용을 기재하기 위해, optB88-vdW 법의 반대르발스 상호작용을 포 함하였다. 500eV의 컷오프 에너지를 사용하였고 16Å보다 큰 진공 영역을 적용하였다. 각 원자에의 잔여 Hellmann-Feynman 힘 0.01 eV/Å 보다 작아질 때까지 모든 시스템은 완전히 최적화되었다. 3×7 k-mesh의 Monkhorst-Pack k-point 샘플링을 사용하여 Brillouin 영역 통합을 수행하였다. HSE06 혼성 함수를 사용하여 밴드 구조 및 광학 특성을 계산하였다.
- [0018] 본 발명에서 이중층 헤테로구조는 한 층의 포스포린 층과 한 층의 h-BN 층으로 이뤄지고, 한편 샌드위치 헤테로 구조는 h-BN 층들이 한 층의 포스포린 층의 포갠(encapsulated) 구조이다. 헤테로구조의 격자 불일치를 해결하 기 위해, (3×1) 단순 격자의 포스포린 층과 (4×1) 초기 사방정계 격자의 h-BN 층을 선택하였다. 새롭게 구성 된 격자의 격자 상수를 선택하여 3×1 포스포린 격자의 것으로 맞췄다. 따라서, 헤테로구조의 격자 상수는 a = 9.90 Å(지그재그 방향) 및 b = 4.62 Å(압축어 방향)이었고 이는 ~1%의 전체 유형(overall strain)을 야기하 였다.
- [0019] 도1의 a 및 b는 단일층 및 샌드위치된 3층 헤테로구조의 최적화된 기하구조의 세 개의 기초 직각도면 (orthographic views)을 보여준다. 2층 구조의 가장 안정한 흡착 구성을 얻기 위해, 고정된 h-BN 층에 대한 포 스포린 층의 여러 초기 위치로부터 이 형성된 구조의 이완(relaxation)을 시작하였다. 이중층 구조에서, 도 1a 는 이중층 구조의 가장 안정한 흡착 구조였다. 이를 확인하기 위해, x- 및 y- 방향에 따라 연속 유한 변위 (consecutive finite displacements)에 의해 h-BN 층에 대한 포스포린 층을 이동시켜 전체 에너지를 계산하였 다.

- [0020] 도 1의 c는 면내 변위(in-plane displacement)로 전체 에너지 차이의 발전을 보여준다. 도 1의 a 구조에서의 전체 에너지는 참조로서 0으로 설정하였다. x-방향(지그재그 방향)에 따라 포스포린 층을 이동할 때 의미 있는 에너지 차이는 없어서(2 meV 미만), 마찰 없는 이동과 같은 모습이었다. 그러나, 에너지 차이는 y-방향(암체어 방향)에 따라서는 두드러졌다. 수직 이동에 있어서, 도 1의 d에서의 전체 에너지 변화를 계산하였고 전체 에너지 최소값은 3.37 Å의 층간 거리에서 얻었다. 따라서, 도 1a는 실제 전체 에너지 최소값임을 확인하였다. 그럼에도, 1 Å 까지 y-방향으로 포스포린을 변위하였을 때 에너지 차이는 단지 약 0.1 eV 이었다. 포스포린 층은 제한 온도에서 성장 과정에서 가장 낮은 에너지 흡착 위치와 다른 위치에 트랩될 수 있음을 의미한다. 실제로, 여러 다른 기하구조에서 밴드 구조를 계산하였고 평형 기하구조의 것과 비교하여 큰 변화는 발견되지 않았다. 도 1의 a에서 도시된 이 평형 흡착 구조로, h-BN 시트와 포스포린 사이의 결합 에너지를 관계식 $[E_b = [E_{P/BN} - (E_P + E_{BN})]]$ 을 사용하여 계산하였다. 여기서, $E_{(P/BN)}$, E_P , 및 E_{BN} 는 이중층 헤테로구조, 유리된(isolated) 단일 층 포스포린 및 유리된 h-BN 층의 전체 에너지를 각각 가리킨다. h-BN 층은 N 및 B 원자를 포함하는 총 16개 원자를 가지기 때문에, h-BN의 원자당 이중층의 결합에너지는 평형 거리에서 65 meV이다. 3중층에서, 동일한 크기의 결합에너지를 얻었다. 더구나, 더 두꺼운 필름에서 결합에너지의 유사한 값을 얻었다. 결합 에너지의 이 값은 다른 반데르발스 결정 예컨대 그래파이트, 그래핀/포스포린 헤테로구조 및 벌크 헥사고날 보론 나이트라이드에서 관찰된 것과 동일한 크기를 가진다.
- [0021] 도 2의 a 내지 c는 각각 무결점 포스포린, 이중층 및 삼중층 시스템의 계산된 밴드 구조를 보여준다. 유리된 포스포린 층에서, 밴드갭은 PBE로 0.89 eV이었고 혼성 함수법(hybrid functional method (HSE06))으로 1.59 eV이 되었다. 일반적으로, 이 혼성 함수법은 포스포린 시스템에서 PBE 법을 사용한 밴드갭에 비해 0.7 - 0.8 eV 만큼 밴드갭을 높인다. 단일층 포스포린에 대한 계산된 밴드갭은 이전 논문(Han, X.; Morgan Stewart, H.; Shevlin, S. A.; Catlow, C. R. A.; Guo, Z. X. Strain and Orientation Modulated Bandgaps and Effective Masses of 포스포린 Nanoribbons. Nano Lett. 2014, 14 (8), 4607-4614)과 같았다. 이중층 헤테로구조에서, 직접 에너지 밴드 갭은 PBE 및 혼성 함수법에 의해 각각 1.04 eV 및 1.74 eV 였다. 따라서, h-BN 기판은 0.15 eV 만큼 밴드갭을 높이는데 기여하였다. 그럼에도, CBM(conduction band minimum) 및 VBM(valence band maximum) 근처의 밴드-구조의 스펙트럼 모양은 유리된 포스포린 층의 것과 거의 동일하였다. 그래서, 이중층 헤테로구조의 전기 이동 특성은 포스포린에 의해 여전히 지배될 것이다. 3중층 헤테로구조에서, 밴드갭은 PBE 및 HSE06 법으로 각각 1.20 eV 및 1.90 eV 만큼 더 높아졌다. 높아진 갭으로도, 일반 밴드 모양은 다시 유지되었다. 이는 포스포린-기초한 장치 적용에 있어서 중요한 특징일 것이며, 왜냐하면 h-BN 층은 주위 환경에서 열화로부터 포스포린을 보호하는 물론 포스포린의 고유 전기 구조를 크게 방해하지 않기 때문이다.
- [0022] 본 발명자는 h-BN 층 때문에 포스포린 층의 밴드갭은 높아졌고 각 h-BN 층은 약 0.15 eV의 밴드갭을 증가에 기여함을 발견하였다. h-BN 두께 증가에 의해 밴드 갭이 어떠한 영향을 받는지 살펴보았다. 그래서, 본 발명자는 둘 이상의 시스템을 고려하기 위해, BN(1ML)/포스포린/BN(2ML) 및 BN(2ML)/포스포린/BN(2ML)과 같은 위 그리고 아래 층에 BN 두께를 바꾸었다. 이 모든 시스템에서, HSE06 방법으로 1.90 eV의 밴드갭이었다. 따라서, BN(1ML)/포스포린/BN(1ML) 구조에서 발견된 밴드갭은 포화된 값이었다. 이 두 시스템의 밴드 구조의 스펙트럼 모양은 BN(1ML)/포스포린/BN(1ML)의 것과 대부분 동일하였다. 이 결과는 BN(1ML)/포스포린/BN(1ML)은 잘 보호되고 또 다른 h-BN 층은 포스포린 층과 강한 상호작용을 하지 않음을 보여준다.
- [0023] 도 3은 무결점 포스포린 층, 포스포린/BN(1ML) 및 BN(1ML)/포스포린/BN(1ML)의 계산된 밀도 상태(calculated density of states (DOS))를 보여준다. 도시된 바와 같이, 혼성화된 시스템에서, 인 원자는 CBM 및 VBM 근처의 저지대(low-lying bands)에 주로 기여했다. 특히, 저지대 원자가 밴드는 주로 인 pz 오비탈로 구성된다.
- [0024] 포스포린은 이등방성 전기 전송 특성을 가지는 것으로 알려져 있다. 따라서 h-BN 층에 의해 이 유효 질량 및 이 등방성 특성이 영향을 받는지 밝히는 것은 중요한 문제일 것이다. 이를 밝히기 위해, HSE06 방법을 사용하여 계산된 밴드 구조로부터 이 유효 질량을 추정하였다. 본원에서 이 유효 질량 추정을 위해, 본 발명자는 CBM 및 VBM 근처의 이차 밴드 산포도(quadratic band dispersion)를 가정하였다. 계산된 결과를 표1에 제시한다.

[0025] [표1]

	$\Gamma-X$		$\Gamma-Y$	
	(m_h^*/m_e)	(m_e^*/m_e)	(m_h^*/m_e)	(m_e^*/m_e)
bare phosphorene	7.43	1.20	0.17	0.19
BP+1L-BN	7.49	1.24	0.20	0.21
BP+2L-BN	8.5	1.25	0.23	0.23
BP+3L-BN	8.53	1.25	0.23	0.23
BP+4L-BN	8.67	1.25	0.23	0.23

^aThe m_e is the electron rest mass.

[0026]

[0027]

표 1은 무결점 포스포린과 헤테로구조에서 홀(m_h^*/m_e) 및 전자(m_e^*/m_e)의 유효 질량의 계산된 비율이다. 무결점 포스포린에 있어서, $\Gamma-X$ 방향(지그재그 방향)에 따른 홀 및 전자 전하 유효 질량은 $\Gamma-Y$ 방향(암체어 방향)에 따른 것보다 훨씬 무겁고, 추정된 유효 질량은 이전 결과에 꽤 가깝다. 헤테로구조에서, 전도 및 원자가전자 밴드에서 유효 질량은 BN 층의 캡핑 때문에 증가됨을 보여주었다. 도 2에서 도시된 바와 같이, $\Gamma-Y$ 방향(암체어 방향)에 따른 밴드 산포도는 양전환(well-behaved) 이차 특징을 보여주었지만, VBM의 밴드 산포도는 $\Gamma-Y$ 방향에 따라 좋은 2차 특징에 벗어났다. 헤테로구조에서, 이등방성 비율에 작은 억눌림에도, 이등방성 유효 질량은 여전히 BN 층의 존재에도 여전히 유지되었다. 무결점 포스포린 층에서 관찰된 타고난 이등방성 전기 전송 특성은 BN/포스포린/BN 시스템에서 유지될 수 있다.

[0028]

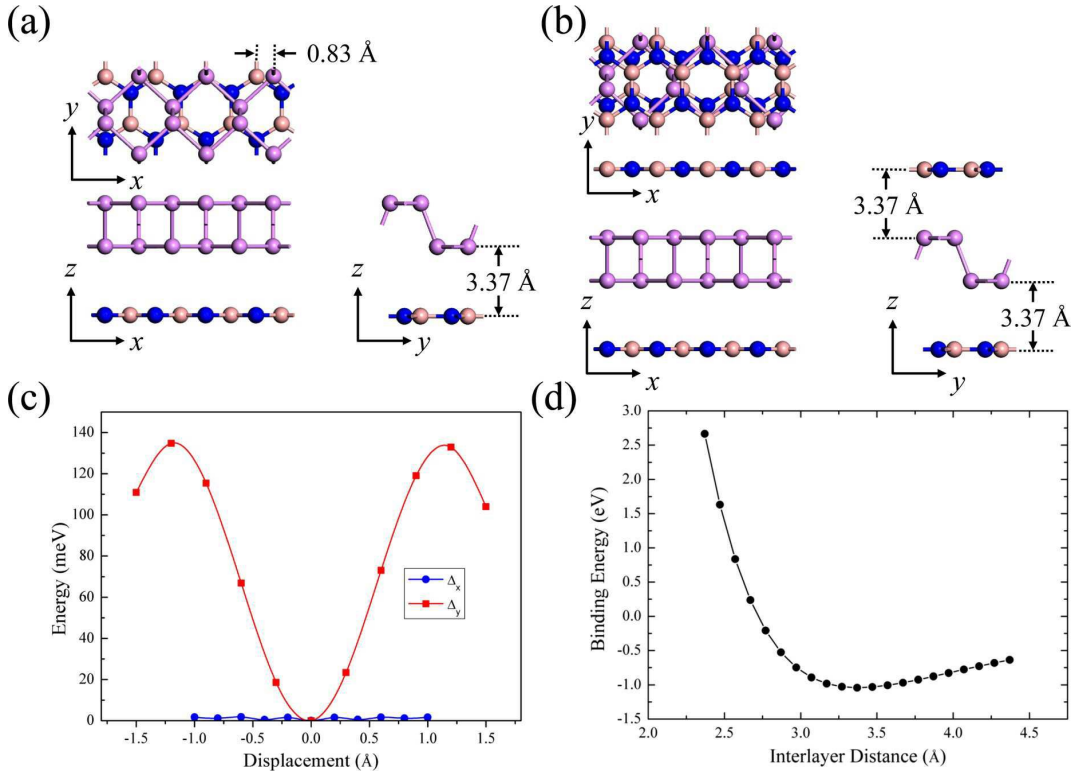
이등방성 전송 특성에 따라, 포스포린 층은 또한 이등방성 광학 특성을 보여준다. 따라서, 아래와 같이 광학 특성을 계산하였다. 본원에서, 지그재그 및 암체어와 같은 두개의 전계 극성을 고려하였다. 일반적으로 물질의 광학특성은 주파수-의존 유전 함수($\epsilon(\omega)=\epsilon_1(\omega)+i\epsilon_2(\omega)$)로부터 이해될 수 있다.

[0029]

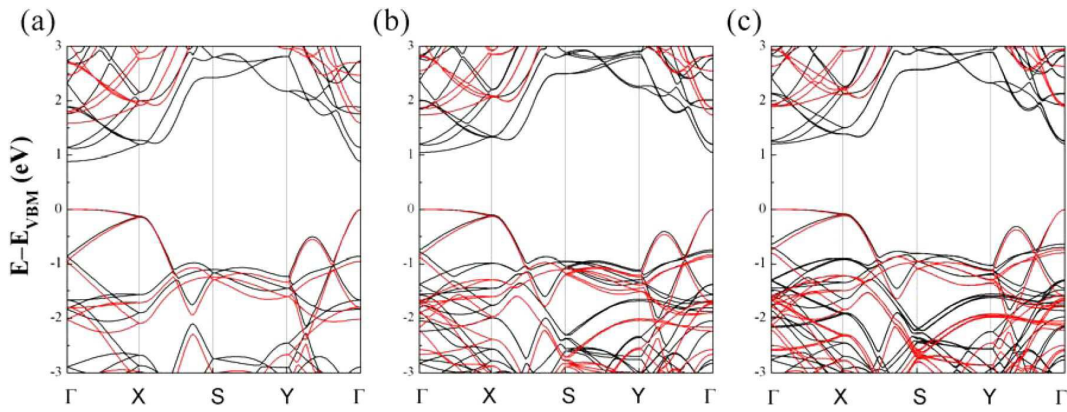
도 4는 암체어 및 지그재그 방향에 따른 HSE06 함수법을 사용하여 주파수-의존 유전 함수를 보여준다. 암체어 방향에 따른 전계 극성에 있어서, 무결점 포스포린 층에서 제1 피크 위치는 약 1.5eV에서 관찰되었다. 놀랍게도, 제1 피크 위치는 이중층 및 삼중층 시스템에서 각각 1.65 및 1.8 eV로 이동되었다. 3중 층 두께를 넘어서는 피크 위치에 큰 차이는 없었다. 따라서, 본 발명자는 제1 피크 위치에서 필름 두께가 증가함에 블루 시프트를 명백히 발견하였고 왜냐하면 이는 높은 에너지 레짐(energy regime)으로 이동되었기 때문이다. 이 특성은 도 2에 도시된 계산된 밴드 구조로부터 이해될 수 있는데, 왜냐하면 $\Gamma-Y$ 방향 근처 CBmdms 필름 두께 증가에 따라 상향 시프트를 보여주기 때문이다. 결론적으로 블루 시프트 특성을 관찰하였다. 지그재그 방향의 전계 극성에 있어서, 무결점 포스포린 층에서 제1 피크 위치는 3.1eV에서 관찰되었다. 그러나 필름 두께 증가에 따라 피크 위치에 레드 시프트 특성을 관찰하였다. 포스포린 층의 타고난 이등방성 광학 특성은 BN/포스포린/BN 헤테로 구조에서 여전히 유지되었다.

도면

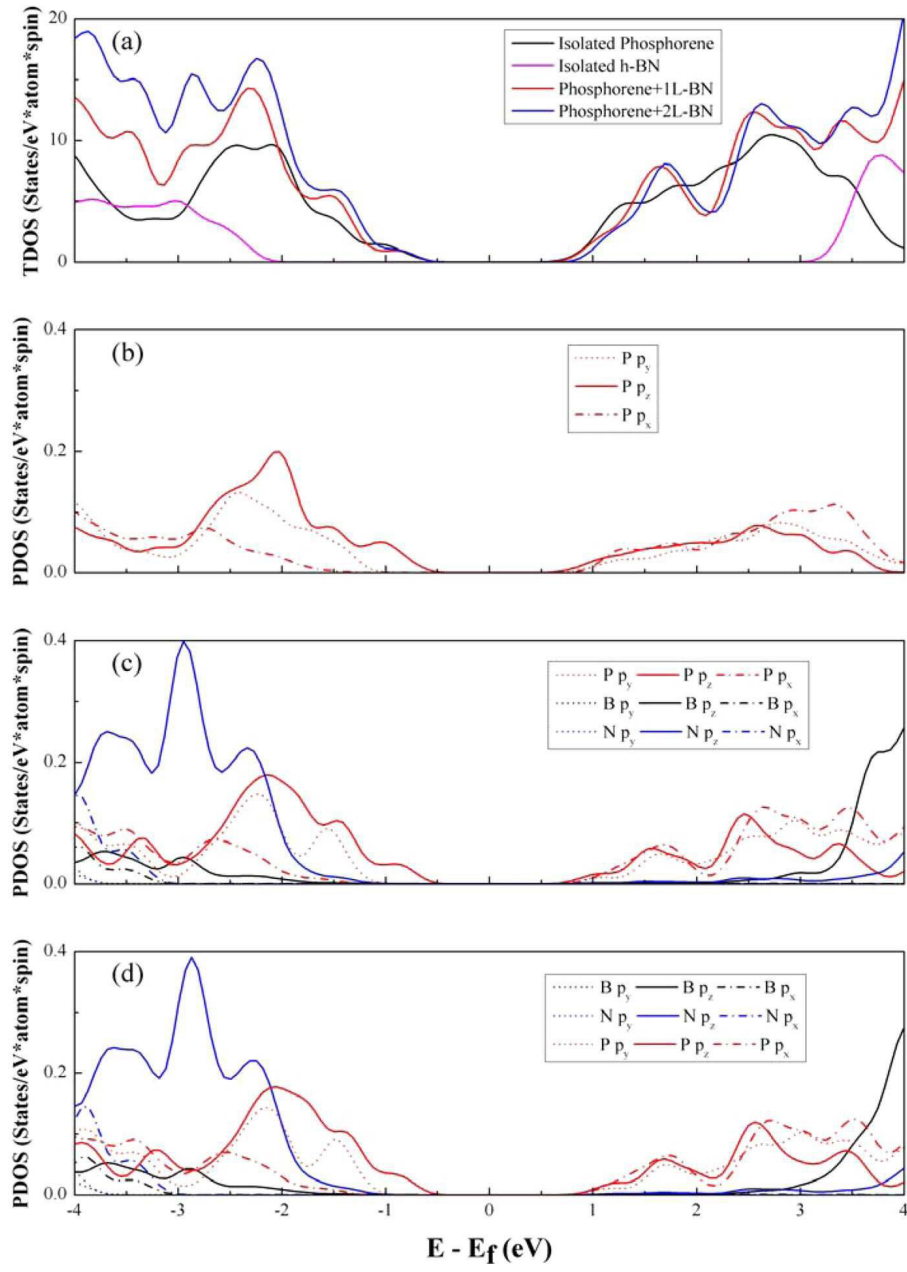
도면1



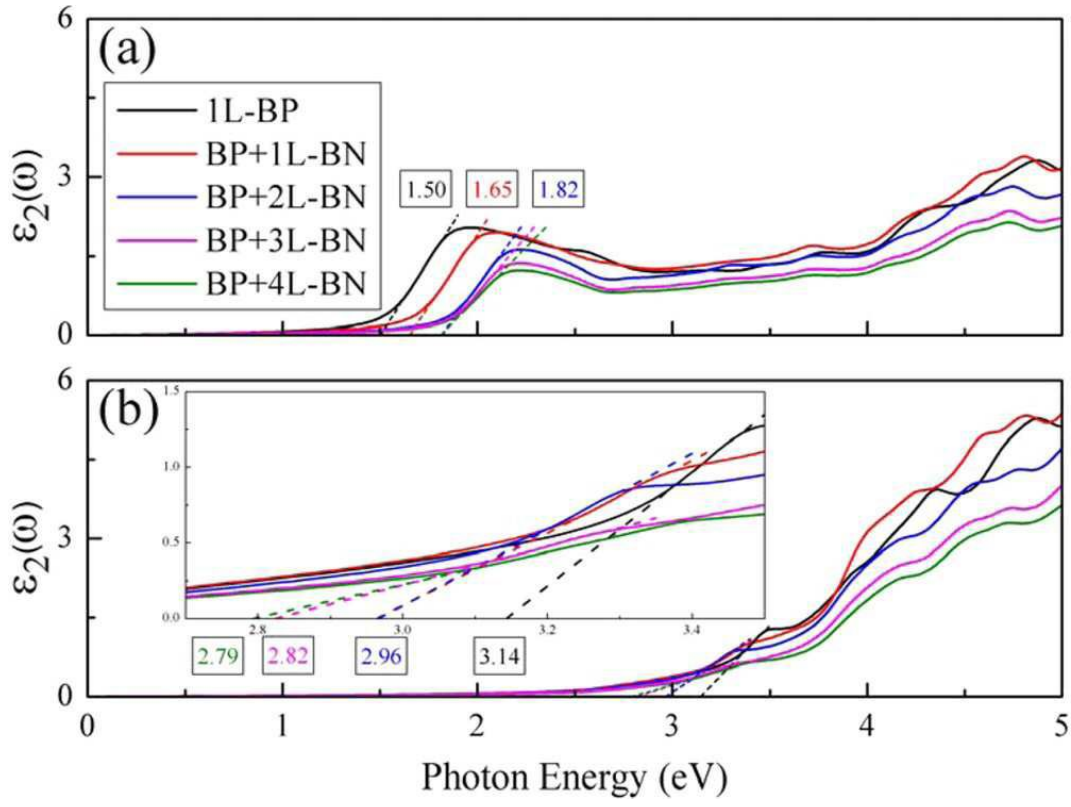
도면2



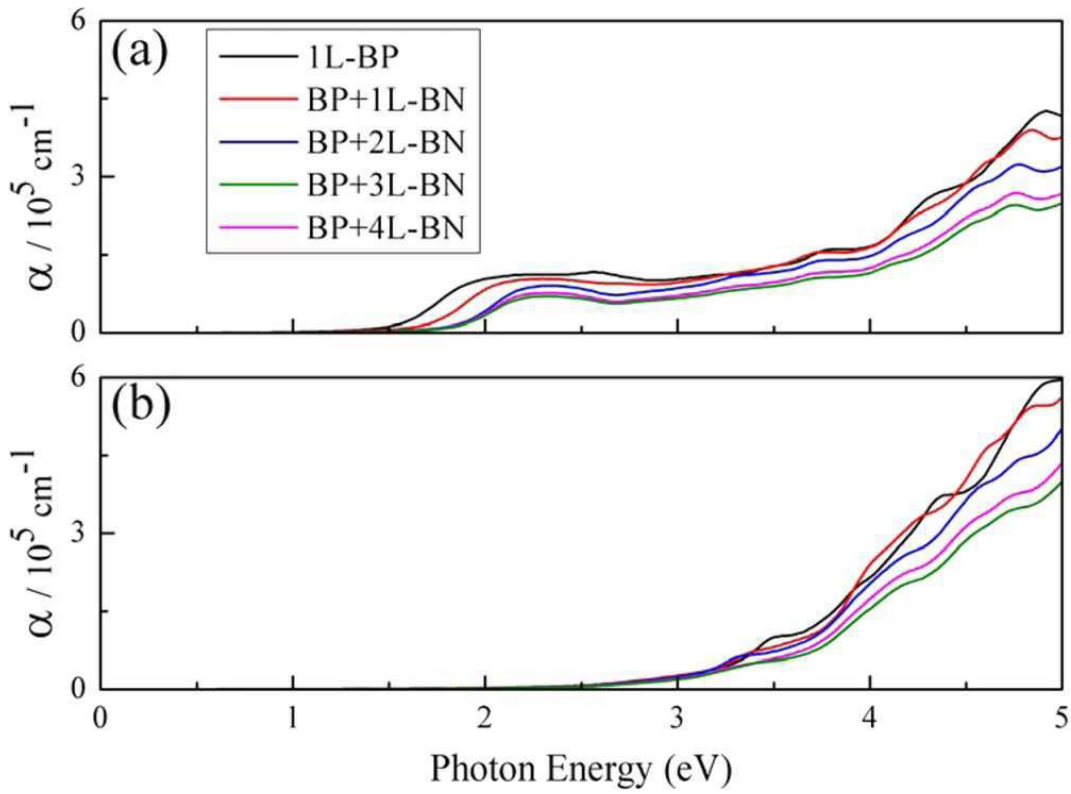
도면3



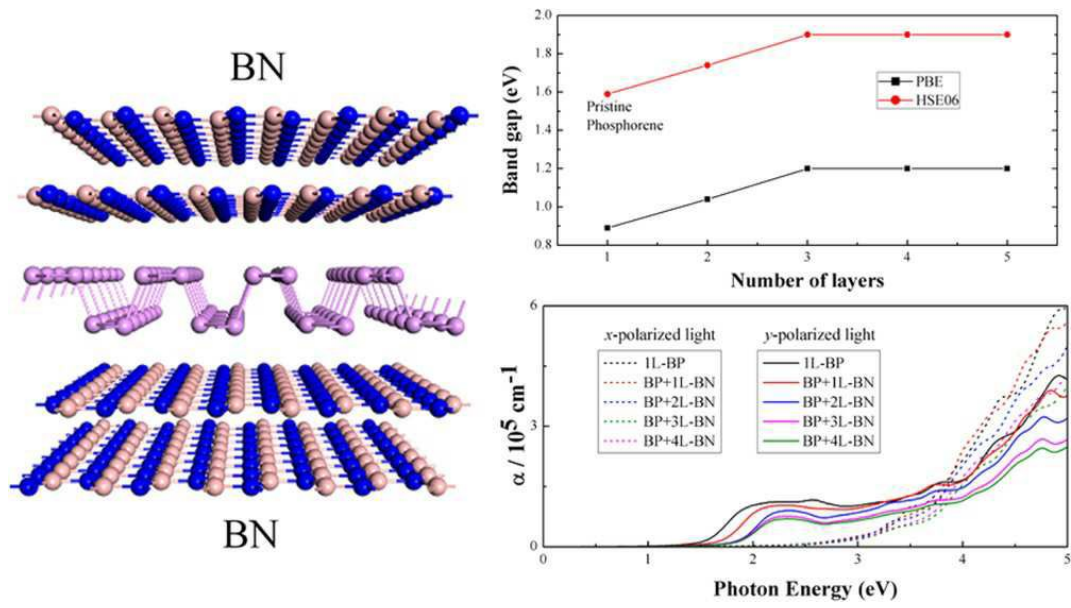
도면4



도면5



도면6



【심사관 직권보정사항】

【직권보정 1】

【보정항목】 청구범위

【보정세부항목】 청구항 1

【변경전】

상기 포스포린 시트의 일면

【변경후】

상기 포스포린 층의 일면