

(19) 대한민국특허청(KR)  
(12) 공개특허공보(A)(11) 공개번호 10-2021-0046641  
(43) 공개일자 2021년04월28일

- (51) 국제특허분류(Int. Cl.)  
H01L 31/10 (2006.01) H01L 31/0224 (2006.01)  
H01L 31/032 (2006.01) H01L 31/0392 (2006.01)  
H01L 31/18 (2006.01)
- (52) CPC특허분류  
H01L 31/10 (2013.01)  
H01L 31/0224 (2013.01)
- (21) 출원번호 10-2021-0052259(분할)
- (22) 출원일자 2021년04월22일  
심사청구일자 2021년04월22일
- (62) 원출원 특허 10-2019-0008733  
원출원일자 2019년01월23일  
심사청구일자 2019년01월23일
- (30) 우선권주장  
16/234,967 2018년12월28일 미국(US)
- (71) 출원인  
연세대학교 산학협력단  
서울특별시 서대문구 연세로 50 (신촌동, 연세대학교)
- (72) 발명자  
안중현  
서울특별시 서대문구 연세로 50(신촌동)  
이원호  
서울특별시 서대문구 연세로 50(신촌동)  
이용준  
서울특별시 서대문구 연세로 50(신촌동)
- (74) 대리인  
김연권

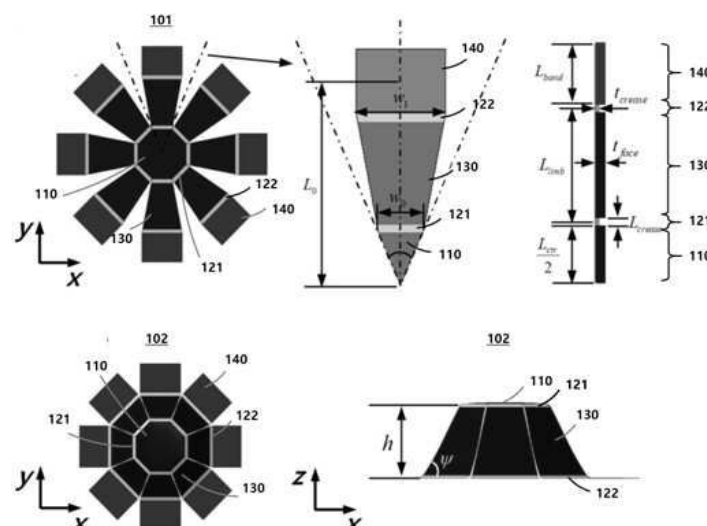
전체 청구항 수 : 총 21 항

## (54) 발명의 명칭 3차원 구조의 광검출 소자 및 그의 제조 방법

## (57) 요약

본 발명은 3차원 구조의 광검출 소자 및 그 제조 방법을 개시한다. 본 발명의 실시예에 따른 3차원 구조의 광검출 소자는 중앙 영역에 형성되는 베이스부(base part); 상기 베이스부의 둘레에 형성된 제1 절곡부(first bending part); 상기 제1 절곡부를 통해 상기 베이스부에 연결되는 적어도 하나의 가지부(branch part); 상기 적어도 하나의 가지부에 형성된 제2 절곡부(second bending part); 상기 제2 절곡부를 통해 상기 적어도 하나의 가지부에 연결되는 본딩부(bonding part); 상기 베이스부 및 상기 가지부 중 적어도 어느 하나의 표면에 형성되는 적어도 하나의 광저항기(photoresistor); 및 상기 본딩부가 부착되는 연신 기판을 포함하고, 상기 본딩부는 상기 베이스부가 상기 연신 기판의 두께 방향으로 갭(gap)을 갖도록 상기 연신 기판에 부착되며, 상기 적어도 하나의 광저항기는 광의 이동 방향을 추적(tracking)하는 것을 특징으로 한다.

## 대표도 - 도1



(52) CPC특허분류

*H01L 31/0324* (2013.01)

*H01L 31/03926* (2013.01)

*H01L 31/18* (2021.01)

이 발명을 지원한 국가연구개발사업

과제고유번호	1711060460
과제번호	2015R1A3A2066337
부처명	과학기술정보통신부
과제관리(전문)기관명	한국연구재단
연구사업명	리더연구자지원사업
연구과제명	변형 제어 고성능 전자 소자 연구단(3/3,1단계)
기 여 율	1/1
과제수행기관명	연세대학교 산학협력단
연구기간	2017.12.01 ~ 2018.09.30

---

## 명세서

### 청구범위

#### 청구항 1

중앙 영역에 형성되는 베이스부;  
 상기 베이스부의 둘레에 형성된 제1 절곡부;  
 상기 제1 절곡부를 통해 상기 베이스부에 연결되는 적어도 하나의 가지부;  
 상기 적어도 하나의 가지부에 형성된 제2 절곡부;  
 상기 제2 절곡부를 통해 상기 적어도 하나의 가지부에 연결되는 본딩부;  
 상기 베이스부 및 상기 가지부 중 적어도 어느 하나의 표면에 형성되는 적어도 하나의 광저항기; 및  
 상기 본딩부가 부착되는 연신 기관  
 을 포함하고,  
 상기 본딩부는 상기 베이스부가 상기 연신 기관의 두께 방향으로 갭(gap)을 갖도록 상기 연신 기관에 부착되며,  
 상기 적어도 하나의 광저항기는 광의 이동 방향을 추적(tracking)하고,  
 상기 제1 절곡부의 두께 및 상기 제2 절곡부의 두께는 상기 베이스부의 두께 또는 상기 적어도 하나의 가지부의 두께보다 상대적으로 얇은 것을 특징으로 하는 3차원 구조의 광검출 소자.

#### 청구항 2

제1항에 있어서,  
 상기 적어도 하나의 광저항기는 상기 3차원 구조의 광검출 소자로 입사되는 입사광의 입사 위치를 검출하고, 상기 입사광이 상기 3차원 구조의 광검출 소자로부터 출사되는 출사 위치를 검출하여 상기 입사광의 이동 방향을 추적하는 것을 특징으로 하는 3차원 구조의 광검출 소자.

#### 청구항 3

제1항에 있어서,  
 상기 3차원 구조의 광검출 소자는 광의 발산각(divergence angle)을 검출하는 것을 특징으로 하는 3차원 구조의 광검출 소자.

#### 청구항 4

제1항에 있어서,  
 상기 3차원 구조의 광검출 소자는 광의 강도를 검출하는 것을 특징으로 하는 3차원 구조의 광검출 소자.

#### 청구항 5

중앙 영역에 형성되는 베이스부;  
 상기 베이스부의 둘레에 형성된 제1 절곡부;

상기 제1 절곡부를 통해 상기 베이스부에 연결되는 적어도 하나의 가지부;  
 상기 적어도 하나의 가지부에 형성된 제2 절곡부;  
 상기 제2 절곡부를 통해 상기 적어도 하나의 가지부에 연결되는 본딩부;  
 상기 베이스부 및 상기 가지부 중 적어도 어느 하나의 표면에 형성되는 적어도 하나의 광저항기; 및  
 상기 본딩부가 부착되는 연신 기관  
 을 포함하고,  
 상기 본딩부는 상기 베이스부가 상기 연신 기관의 두께 방향으로 갭(gap)을 갖도록 상기 연신 기관에 부착되며,  
 상기 적어도 하나의 광저항기는 광의 이동 방향을 추적(tracking)하고,  
 상기 광저항기는,  
 제1 기재 상에 형성되고, 서로 이격되는 제1 전극 및 제2 전극;  
 상기 제1 기재 상에 형성되고, 상기 제1 전극 및 상기 제2 전극 사이에 배치되는 2차원 전이금속 칼코겐 화합물  
 (2D Transition Metal Dichalcogenides) 채널; 및  
 상기 제1 전극, 상기 제2 전극 및 상기 2차원 전이금속 칼코겐 화합물 채널이 형성된 제1 기재 상에 형성되는  
 제2 기재를 포함하는 것을 특징으로 하는 3차원 구조의 광검출 소자.

#### 청구항 6

제5항에 있어서,  
 상기 2차원 전이금속 칼코겐 화합물 채널이 형성되는 제1 기재의 표면 상에 제1 보호층을 더 포함하는 것을 특  
 징으로 하는 3차원 구조의 광검출 소자.

#### 청구항 7

제6항에 있어서,  
 상기 2차원 전이금속 칼코겐 화합물 채널과 맞닿는 상기 제2 기재의 표면상에 제2 보호층을 더 포함하는 것을  
 특징으로 하는 3차원 구조의 광검출 소자.

#### 청구항 8

제5항에 있어서,  
 상기 2차원 전이금속 칼코겐 화합물 채널은 이황화 몰리브덴(Molybdenum Disulfide,  $\text{MoS}_2$ ), 이셀레니드 몰리브  
 덴(Molybdenum Diselenide,  $\text{MoSe}_2$ ), 이황화 텅스텐(ungsten Disulfide,  $\text{WS}_2$ ), 이셀레니드 텅스텐(Tungsten  
 Diselenide,  $\text{WSe}_2$ ), 이텔루리드 텅스텐(Tungsten Ditelluride,  $\text{WTe}_2$ ), 이텔루리드 몰리브덴(Molybdenum  
 Ditelluride,  $\text{MoTe}_2$ ), 이셀레니드 주석(Tin Diselenide,  $\text{SnSe}_2$ ), 이황화 지르코늄(zirconium Disulfide,  $\text{ZrS}_2$ ),  
 이셀레니드 지르코늄(zirconium Diselenide,  $\text{ZrSe}_2$ ), 이황화 하프늄(hafnium Disulfide,  $\text{HfS}_2$ ), 이셀레니드 하  
 프늄(hafnium Diselenide,  $\text{HfSe}_2$ ), 이셀레니드 니오븀(niobium Diselenide,  $\text{NbSe}_2$ ) 및 이셀레니드 레늄(rhenium  
 Diselenide,  $\text{ReSe}_2$ ) 중 적어도 어느 하나를 포함하는 것을 특징으로 하는 3차원 구조의 광검출 소자.

#### 청구항 9

제5항에 있어서,

상기 제1 전극 또는 제2 전극은 그래핀(graphene)을 포함하는 것을 특징으로 하는 3차원 구조의 광검출 소자.

#### 청구항 10

제5항에 있어서,

상기 제1 기재 또는 제2 기재는 투명한 고분자 물질로 형성되는 것을 특징으로 하는 3차원 구조의 광검출 소자.

#### 청구항 11

제7항에 있어서,

상기 제1 보호층 또는 제2 보호층은 산화물( $Al_2O_3$ ), 실리콘 산화물( $SiO_2$ ), 실리콘 산질화물( $SiON$ ), 하프늄 산화물( $HfO_x$ ), 지르코늄 산화물( $ZrO_2$ ), 마그네슘 산화물( $MgO$ ), 티타늄 산화물( $TiO_2$ ), 아연 산화물( $ZnO$ ), 텅스텐 산화물( $WO_3$ ), 탄탈륨 산화물( $Ta_2O_5$ ), 니오븀 산화물( $Nb_2O_5$ ), 이트륨 산화물( $Y_2O_3$ ), 세륨 산화물( $CeO_2$ ), 란타넘 산화물( $La_2O_3$ ), 에르븀 산화물( $Er_2O_3$ ), 하프늄 알루미늄 산화물( $HfAlO$ ), 하프늄 실리콘 산화물( $HfSiO$ ), 지르코늄 실리콘 산화물( $ZrSiO$ ), 지르코늄 알루미늄 산화물( $ZrAlO$ ), 하프늄 산질화물( $HfON$ ), 하프늄 실리콘 산질화물( $HfSiON$ ), 실리콘 질화물( $SiN_x$ ), SiBN(silicon boron nitride) 및 h-BN(hexagonal-boron nitride) 중 적어도 어느 하나를 포함하는 것을 특징으로 하는 3차원 구조의 광검출 소자.

#### 청구항 12

중앙 영역에 형성되는 베이스부;

상기 베이스부의 둘레에 형성된 제1 절곡부;

상기 제1 절곡부를 통해 상기 베이스부에 연결되는 적어도 하나의 가지부;

상기 적어도 하나의 가지부에 형성된 제2 절곡부;

상기 제2 절곡부를 통해 상기 적어도 하나의 가지부에 연결되는 본딩부;

상기 베이스부 및 상기 가지부 중 적어도 어느 하나의 표면에 형성되는 적어도 하나의 광저항기; 및

상기 본딩부가 부착되는 연신 기관

을 포함하고,

상기 본딩부는 상기 베이스부가 상기 연신 기관의 두께 방향으로 갭(gap)을 갖도록 상기 연신 기관에 부착되며,

상기 적어도 하나의 광저항기는 광의 이동 방향을 추적(tracking)하고,

상기 광저항기는,

제1 기재 상에 형성되고, 서로 이격되는 제1 전극 및 제2 전극;

상기 제1 기재 상에 형성되고, 상기 제1 전극 및 상기 제2 전극 사이에 배치되는 p-type 2차원 전이금속 칼코겐 화합물 및 n-type 2차원 전이금속 칼코겐 화합물; 및

상기 제1 전극, 상기 제2 전극, 상기 p-type 2차원 전이금속 칼코겐 화합물 및 상기 n-type 2차원 전이금속 칼코겐 화합물이 형성된 제1 기재 상에 형성되는 제2 기재를 포함하는 것을 특징으로 하는 3차원 구조의 광검출 소자.

### 청구항 13

제12항에 있어서,

상기 광저항기는,

헤테로 P-N 접합(hetero P-N junction) 구조 또는 호모 P-N 접합(homo P-N junction) 구조인 것을 특징으로 하는 3차원 구조의 광검출 소자.

### 청구항 14

지지 기판 상에 제1 기재를 코팅하는 단계;

상기 제1 기재를 베이스부, 제1 절곡부, 적어도 하나의 가지부, 제2 절곡부 및 본딩부와 대응되도록 패터닝하는 단계;

상기 패터닝된 제1 기재의 상기 베이스부 및 상기 가지부 중 적어도 어느 하나의 표면에 적어도 하나의 광저항기를 형성하는 단계;

상기 적어도 어느 하나의 광저항기를 포함하는 상기 패터닝된 제1 기재 상에 제2 기재를 형성하는 단계;

상기 제1 기재로부터 상기 지지 기판을 분리하는 단계;

상기 제1 절곡부 및 상기 제2 절곡부에 대응하는 상기 제1 기재 및 상기 제2 기재 중 적어도 어느 하나에 오픈부(opening portion)를 형성하고, 2차원 광검출 구조체를 수득하는 단계;

연신 기판을 연신시켜 신장 상태를 형성하는 단계;

상기 신장 상태의 연신 기판 상에 상기 2차원 광검출 구조체를 부착시키는 단계;

상기 연신 기판으로부터 상기 베이스부 및 상기 가지부의 결합을 약화시키는 단계; 및

상기 연신 기판의 신장 상태를 해제하여 2차원 광검출 구조체를 3차원 구조로 자가-조립(self-assembly)시키는 단계

를 포함하는 것을 특징으로 하는 3차원 구조의 광검출 소자의 제조 방법.

### 청구항 15

제14항에 있어서,

상기 적어도 하나의 광저항기를 형성하는 단계는,

상기 패터닝된 제1 기재의 상기 베이스부 및 상기 가지부 중 적어도 어느 하나의 표면에 서로 이격되는 제1 전극 및 제2 전극을 형성하는 단계;

상기 패터닝된 제1 기재의 상기 베이스부 및 상기 가지부 중 적어도 어느 하나의 표면에 형성되고, 상기 제1 전극 및 상기 제2 전극 사이에 배치되는 2차원 전이금속 칼코젠 화합물 채널을 형성하는 단계;

상기 제1 전극, 상기 제2 전극 및 상기 2차원 전이금속 칼코젠 화합물 채널이 형성된 상기 패터닝된 제1 기재 상에 상기 제2 기재를 형성하는 단계

를 포함하는 것을 특징으로 하는 3차원 구조의 광검출 소자의 제조 방법.

### 청구항 16

제15항에 있어서,

상기 패터닝된 제1 기재 상에 제1 보호층을 형성하는 단계를 더 포함하는 것을 특징으로 하는 3차원 구조의 광

검출 소자의 제조 방법.

#### 청구항 17

제15항에 있어서,

상기 제2 기재를 형성하는 단계는,

상기 제1 전극, 상기 제2 전극 및 상기 2차원 전이금속 칼코겐 화합물 채널이 형성된 상기 패터닝된 제1 기재 상에 제2 보호층을 형성하는 단계를 더 포함하는 것을 특징으로 하는 3차원 구조의 광검출 소자의 제조 방법.

#### 청구항 18

제14항에 있어서,

상기 제1 기재 및 제2 기재 중 적어도 어느 하나에 오프닝부를 형성하고, 2차원 광검출 구조체를 수득하는 단계는,

상기 오프닝부에 포토레지스트(photoresist, PR)를 도포하는 단계를 더 포함하는 것을 특징으로 하는 3차원 구조의 광검출 소자의 제조 방법.

#### 청구항 19

제15항에 있어서,

상기 제1 기재 및 제2 기재 중 적어도 어느 하나에 오프닝부를 형성하고, 2차원 광검출 구조체를 수득하는 단계는,

상기 2차원 광검출 구조체의 상기 베이스부, 상기 제1 절곡부, 상기 가지부 및 상기 제2 절곡부 중 적어도 어느 하나에 대응하는 표면에 포토레지스트를 형성하는 단계를 더 포함하는 것을 특징으로 하는 3차원 구조의 광검출 소자의 제조 방법.

#### 청구항 20

제14항에 있어서,

상기 2차원 광검출 구조체를 수득하는 단계는,

상기 2차원 광검출 구조체 상에 제1 자외선/오존(UV/O<sub>3</sub>)를 진행하는 단계를 더 포함하는 것을 특징으로 하는 3차원 구조의 광검출 소자의 제조 방법.

#### 청구항 21

제14항에 있어서,

상기 연신 기판을 연신시켜 신장 상태를 형성하는 단계는,

상기 연신 기판 상에 제2 자외선/오존(UV/O<sub>3</sub>)를 진행하는 단계를 더 포함하는 것을 특징으로 하는 3차원 구조의 광검출 소자의 제조 방법.

### 발명의 설명

### 기술 분야

[0001] 본 발명의 실시예는 3차원 구조의 광검출 소자 및 그의 제조 방법에 관한 것으로, 보다 상세하게는 3차원 구조에 2차원 물질을 적용하여 광의 이동 방향을 추적할 수 있는 3차원 구조의 광검출 소자 및 그의 제조 방법에 관한 것이다.

## 배경 기술

[0003] 광검출 소자는 광신호를 전기적인 신호로 바꾸어 주는 역할을 하는 소자로서, 초고속 대용량 광통신 시스템, 영상처리 시스템, 의료기기 등 다양한 산업 분야에서 다양한 용도로 사용되고 있다.

[0004] 종전에는 광검출 소자로 기관 상에 평면 구조로 형성되는 2차원 구조로 제작되었으나, 광검출 소자가 2차원 구조로 형성되면 광의 방향 및 발산각을 측정하지 못하는 한계점이 있었다. 따라서, 광검출 소자의 한계점을 극복하기 위해서는 2차원 구조를 넘어서 3차원 구조를 갖는 소자를 제작하거나 얇은 두께와 높은 투과도를 갖는 이차원 물질을 적용하는 기술이 필요하다.

[0005] 이러한 문제를 극복하기 위해, 3차원 형태를 갖는 광검출 구조체를 제작하는 기술이 연구되었으나, 3차원 형태를 갖는 광검출 구조체는 형태만 3차원을 갖기 때문에 실제 전자 소자로 적용할 수 없어, 광검출 소자를 3차원 구조체로 구현할뿐만 아니라, 전자 소자(Electronic device)로 구현하기 위해서는 3차원 프레임(3D frame) 상에 다양한 기능성 물질들을 집적해야 하는 문제가 있었다.

[0006] 또한, 종전의 3차원 형태를 갖는 광검출 소자 구조체는 무기물이나 유기물 기반으로 개발되나, 무기물이나 유기물은 3차원 구조체를 제작 시 가해지는 기계적 스트레인에 의해 손상 및 성능 저하가 발생되고, 특히, 유기물은 포토리소그래피를 적용하기 어렵기 때문에 새로운 공정 방법을 적용해야 하는 문제가 있다.

[0007] 따라서, 다양한 기능성 물질들을 집적 없이 실제 전자 소자로 적용할 수 있는 3차원 구조체의 광검출 소자에 대한 연구가 필요하고, 더욱이, 전사 공정이 가능하고, 기계적 특성이 우수한 동시에 투명한 특성을 갖는 광 검출 소자를 제조하여 광 검출 소자의 특성을 향상시키는 기술에 관한 연구가 필요하다.

## 선행기술문헌

### 특허문헌

- [0009] (특허문헌 0001) 한국등록특허 제10-1515119호, "광검출소자 및 그 제조방법"  
 (특허문헌 0002) 한국등록특허 제10-1430650호, "광검출 소자"  
 (특허문헌 0003) 한국등록특허 제10-1079919호, "반도체 광검출 소자 및 그 제조 방법"

## 발명의 내용

### 해결하려는 과제

[0010] 본 발명의 실시예의 목적은 적어도 하나의 광저항기를 포함하는 3차원 구조의 광검출 소자를 제조하여 광의 이동 방향을 추적(tracking)하고자 한다.

[0011] 본 발명의 실시예의 목적은 2차원 전이금속 칼코겐 화합물 및 그래핀을 사용하여 적어도 하나의 광저항기를 제조함으로써 외부 스트레인(strain)에 대한 안정성을 향상시키고자 한다.

[0012] 본 발명의 실시예의 목적은 연신 기관을 이용하여 2차원 광검출 구조체를 3차원 구조로 자가-조립(self-assembly)시켜 용이하게 3차원 구조의 광검출 소자를 제조하고자 한다.

[0013] 본 발명의 실시예의 목적은 2차원 전이금속 칼코겐 화합물 및 그래핀을 사용하여 기존에 사용되는 포토리소그래피 공정을 이용하여 적어도 하나의 광저항기를 제조하고자 한다.



## 과제의 해결 수단

- [0015] 본 발명의 실시예에 따른 3차원 구조의 광검출 소자는 중앙 영역에 형성되는 베이스부(base part); 상기 베이스부의 둘레에 형성된 제1 절곡부(first bending part); 상기 제1 절곡부를 통해 상기 베이스부에 연결되는 적어도 하나의 가지부(branch part); 상기 적어도 하나의 가지부에 형성된 제2 절곡부(second bending part); 상기 제2 절곡부를 통해 상기 적어도 하나의 가지부에 연결되는 본딩부(bonding part); 상기 베이스부 및 상기 가지부 중 적어도 어느 하나의 표면에 형성되는 적어도 하나의 광저항기(photoresistor); 및 상기 본딩부가 부착되는 연신 기판을 포함하고, 상기 본딩부는 상기 베이스부가 상기 연신 기판의 두께 방향으로 갭(gap)을 갖도록 상기 연신 기판에 부착되며, 상기 적어도 하나의 광저항기는 광의 이동 방향을 추적(tracking)한다.
- [0016] 상기 적어도 하나의 광저항기는 상기 3차원 구조의 광검출 소자로 입사되는 입사광의 입사 위치를 검출하고, 상기 입사광이 상기 3차원 구조의 광검출 소자로부터 출사되는 출사 위치를 검출하여 상기 입사광의 이동 방향을 추적할 수 있다.
- [0017] 상기 3차원 구조의 광검출 소자는 광의 발산각(divergence angle)을 검출할 수 있다.
- [0018] 상기 3차원 구조의 광검출 소자는 광의 강도를 검출할 수 있다.
- [0019] 상기 광저항기는, 제1 기재 상에 형성되고, 서로 이격되는 제1 전극 및 제2 전극; 상기 제1 기재 상에 형성되고, 상기 제1 전극 및 상기 제2 전극 사이에 배치되는 2차원 전이금속 칼코겐 화합물(2D Transition Metal Dichalcogenides) 채널; 및 상기 제1 전극, 상기 제2 전극 및 상기 2차원 전이금속 칼코겐 화합물 채널이 형성된 제1 기재 상에 형성되는 제2 기재를 포함할 수 있다.
- [0020] 상기 2차원 전이금속 칼코겐 화합물 채널이 형성되는 제1 기재의 표면 상에 제1 보호층을 더 포함할 수 있다.
- [0021] 상기 2차원 전이금속 칼코겐 화합물 채널과 맞닿는 상기 제2 기재의 표면상에 제2 보호층을 더 포함할 수 있다.
- [0022] 상기 2차원 전이금속 칼코겐 화합물 채널은 이황화 몰리브덴(Molybdenum Disulfide,  $\text{MoS}_2$ ), 이셀레니드 몰리브덴(Molybdenum Diselenide,  $\text{MoSe}_2$ ), 이황화 텅스텐(tungsten Disulfide,  $\text{WS}_2$ ), 이셀레니드 텅스텐(Tungsten Diselenide,  $\text{WSe}_2$ ), 이텔루리드 텅스텐(Tungsten Ditelluride,  $\text{WTe}_2$ ), 이텔루리드 몰리브덴(Molybdenum Ditelluride,  $\text{MoTe}_2$ ), 이셀레니드 주석(Tin Diselenide,  $\text{SnSe}_2$ ), 이황화 지르코늄(zirconium Disulfide,  $\text{ZrS}_2$ ), 이셀레니드 지르코늄(zirconium Diselenide,  $\text{ZrSe}_2$ ), 이황화 하프늄(hafnium Disulfide,  $\text{HfS}_2$ ), 이셀레니드 하프늄(hafnium Diselenide,  $\text{HfSe}_2$ ), 이셀레니드 니오븀(niobium Diselenide,  $\text{NbSe}_2$ ) 및 이셀레니드 레늄(rhenium Diselenide,  $\text{ReSe}_2$ ) 중 적어도 어느 하나를 포함할 수 있다.
- [0023] 상기 제1 전극 또는 제2 전극은 그래핀(graphene)을 포함할 수 있다.
- [0024] 상기 제1 기재 또는 제2 기재는 투명한 고분자 물질로 형성될 수 있다.
- [0025] 상기 제1 보호층 또는 제2 보호층은 산화물( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), 실리콘 산화물( $\text{SiO}_2$ ), 실리콘 산질화물( $\text{SiON}$ ), 하프늄 산화물( $\text{HfO}_x$ ), 지르코늄 산화물( $\text{ZrO}_2$ ), 마그네슘 산화물( $\text{MgO}$ ), 티타늄 산화물( $\text{TiO}_2$ ), 아연 산화물( $\text{ZnO}$ ), 텅스텐 산화물( $\text{WO}_3$ ), 탄탈륨 산화물( $\text{Ta}_2\text{O}_5$ ), 니오븀 산화물( $\text{Nb}_2\text{O}_5$ ), 이트륨 산화물( $\text{Y}_2\text{O}_3$ ), 세륨 산화물( $\text{CeO}_2$ ), 란타넘 산화물( $\text{La}_2\text{O}_3$ ), 에르븀 산화물( $\text{Er}_2\text{O}_3$ ), 하프늄 알루미늄 산화물( $\text{HfAlO}$ ), 하프늄 실리콘 산화물( $\text{HfSiO}$ ), 지르코늄 실리콘 산화물( $\text{ZrSiO}$ ), 지르코늄 알루미늄 산화물( $\text{ZrAlO}$ ), 하프늄 산질화물( $\text{HfON}$ ), 하프늄 실리콘 산질화물( $\text{HfSiON}$ ), 실리콘 질화물( $\text{SiN}_x$ ), SiBN(silicon boron nitride) 및 h-BN(hexagonal-boron nitride) 중 적어도 어느 하나를 포함할 수 있으나, 이에 제한되지 않고, 패턴과 두께 조절이 가능한 물질이 사용될 수 있다.
- [0026] 상기 광저항기는, 제1 기재 상에 형성되고, 서로 이격되는 제1 전극 및 제2 전극; 상기 제1 기재 상에 형성되고, 상기 제1 전극 및 상기 제2 전극 사이에 배치되는 p-type 2차원 전이금속 칼코겐 화합물 및 n-type 2차원 전이금속 칼코겐 화합물; 및 상기 제1 전극, 상기 제2 전극, 상기 p-type 2차원 전이금속 칼코겐 화합물 및 상기 n-type 2차원 전이금속 칼코겐 화합물이 형성된 제1 기재 상에 형성되는 제2 기재를 포함할 수 있다.
- [0027] 상기 광저항기는, 헤테로 P-N 접합(hetero P-N junction) 구조 또는 호모 P-N 접합(homo P-N junction) 구조일 수 있다.

- [0028] 상기 제1 절곡부의 두께 및 상기 제2 절곡부의 두께는 상기 베이스부의 두께 또는 상기 가지부의 두께보다 상대적으로 얇을 수 있다.
- [0029] 본 발명의 실시예에 따른 3차원 구조의 광검출 소자의 제조 방법은 지지 기판 상에 제1 기재를 코팅하는 단계; 상기 제1 기재를 베이스부, 제1 절곡부, 적어도 하나의 가지부, 제2 절곡부 및 본딩부와 대응되도록 패터닝하는 단계; 상기 패터닝된 제1 기재의 상기 베이스부 및 상기 가지부 중 적어도 어느 하나의 표면에 적어도 하나의 광저항기(photoresistor)를 형성하는 단계; 상기 적어도 어느 하나의 광저항기를 포함하는 상기 패터닝된 제1 기재 상에 제2 기재를 형성하는 단계; 상기 제1 기재로부터 상기 지지 기판을 분리하는 단계; 상기 제1 절곡부 및 상기 제2 절곡부에 대응하는 상기 제1 기재 및 상기 제2 기재 중 적어도 어느 하나에 오프닝부(opening portion)를 형성하고, 2차원 광검출 구조체를 획득하는 단계; 연신 기판을 연신시켜 신장 상태를 형성하는 단계; 상기 신장 상태의 연신 기판 상에 상기 2차원 광검출 구조체를 부착시키는 단계; 상기 연신 기판으로부터 상기 베이스부 및 상기 가지부의 결합을 약화시키는 단계; 및 상기 연신 기판의 신장 상태를 해제하여 2차원 광검출 구조체를 3차원 구조로 자가-조립(self-assembly)시키는 단계를 포함한다.
- [0030] 상기 적어도 하나의 광저항기(photoresistor)를 형성하는 단계는, 상기 패터닝된 제1 기재의 상기 베이스부 및 상기 가지부 중 적어도 어느 하나의 표면에 서로 이격되는 제1 전극 및 제2 전극을 형성하는 단계; 상기 패터닝된 제1 기재의 상기 베이스부 및 상기 가지부 중 적어도 어느 하나의 표면에 형성되고, 상기 제1 전극 및 상기 제2 전극 사이에 배치되는 2차원 전이금속 칼코겐 화합물 채널을 형성하는 단계; 상기 제1 전극, 상기 제2 전극 및 상기 2차원 전이금속 칼코겐 화합물 채널이 형성된 상기 패터닝된 제1 기재 상에 상기 제2 기재를 형성하는 단계를 포함할 수 있다.
- [0031] 상기 패터닝된 제1 기재 상에 제1 보호층을 형성하는 단계를 더 포함할 수 있다.
- [0032] 상기 제2 기재를 형성하는 단계는, 상기 제1 전극, 상기 제2 전극 및 상기 2차원 전이금속 칼코겐 화합물 채널이 형성된 상기 패터닝된 제1 기재 상에 제2 보호층을 형성하는 단계를 더 포함할 수 있다.
- [0033] 상기 제1 기재 및 제2 기재 중 적어도 어느 하나에 오프닝부를 형성하고, 2차원 광검출 구조체를 획득하는 단계는, 상기 오프닝부에 포토레지스트(photoresist, PR)를 도포하는 단계를 더 포함할 수 있다.
- [0034] 상기 제1 기재 및 제2 기재 중 적어도 어느 하나에 오프닝부를 형성하고, 2차원 광검출 구조체를 획득하는 단계는, 상기 2차원 광검출 구조체의 상기 베이스부, 상기 제1 절곡부, 상기 가지부 및 상기 제2 절곡부 중 적어도 어느 하나에 대응하는 표면에 포토레지스트를 형성하는 단계를 더 포함할 수 있다.
- [0035] 상기 2차원 광검출 구조체를 획득하는 단계는, 상기 2차원 구조의 광검출 구조체 상에 제1 자외선/오존(UV/O<sub>3</sub>)를 진행하는 단계를 더 포함할 수 있다.
- [0036] 상기 연신 기판을 연신시켜 신장 상태를 형성하는 단계는, 상기 연신 기판 상에 제2 자외선/오존(UV/O<sub>3</sub>)를 진행하는 단계를 더 포함할 수 있다.

### 발명의 효과

- [0038] 본 발명의 실시예들에 따르면 적어도 하나의 광저항기를 포함하는 3차원 구조의 광검출 소자를 제조하여 광의 이동 방향을 추적(tracking)할 수 있다.
- [0039] 본 발명의 실시예의 목적은 2차원 전이금속 칼코겐 화합물 및 그래핀을 사용하여 적어도 하나의 광저항기를 제조함으로써 외부 스트레인(strain)에 대한 안정성을 향상시킬 수 있다.
- [0040] 본 발명의 실시예들에 따르면 연신 기판을 이용하여 2차원 광검출 구조체를 3차원 구조로 자가-조립(self-assembly)시켜 용이하게 3차원 구조의 광검출 소자를 제조할 수 있다.
- [0041] 본 발명의 실시예들에 따르면 2차원 전이금속 칼코겐 화합물 및 그래핀을 사용하여 기존에 사용되는 포토리스그래피 공정을 이용하여 적어도 하나의 광저항기를 제조할 수 있다.

### 도면의 간단한 설명

[0043]

도 1은 본 발명의 실시예에 따른 3차원 구조의 광검출 소자의 2차원 광검출 구조체, 본 발명의 실시예에 따른 3차원 구조의 광검출 소자의 평면도 및 측면도를 도시한 도면이다.

도 2a는 본 발명의 실시예에 따른 3차원 구조의 광검출 소자의 입체도 및 3차원 구조의 광검출 소자에 포함되는 광저항기의 단면도를 도시한 것이다.

도 2b는 본 발명의 실시예에 따른 3차원 구조의 광검출 소자에 포함되는 광저항기의 밴드갭 에너지를 도시한 도면이다.

도 3a 내지 도 3c는 제1 보호층 또는 제2 보호층을 포함하는 광저항기를 도시한 단면도이다.

도 4a 및 도 4b는 제1 보호층 및 제2 보호층을 포함하는 본 발명의 실시예에 따른 3차원 구조의 광검출 소자에 포함되는 광저항기의 반응을 도시한 단면도이다.

도 5a는 본 발명의 실시예에 따른 3차원 구조의 광검출 소자의 팔각 뿔(Octagonal prismoid) 및 팔각 프리즘(Octagonal prism) 형상에 따른 형상 파라미터(shape parameters) 및 키 디자인 파라미터(Key design parameters)를 도시한 이미지이다.

도 5b는 본 발명의 실시예에 따른 3차원 구조의 광검출 소자의 사전-변형률(pre-strain) 값에 대한 제1 절곡부 및 제2 절곡부의 너비 비(width ratio,  $W_1/W_0$ ) 파라미터를 도시한 그래프이다.

도 5c는 팔각 뿔 및 팔각 프리즘 형상의 본 발명의 실시예에 따른 3차원 구조의 광검출 소자의 높이(h)에 따른 해제된 사전-변형률(released pre-strain)을 도출하기 위한 FEA 및 분석 예측 결과를 도시한 그래프이다.

도 5d는 팔각 뿔 및 팔각 프리즘 형상의 본 발명의 실시예에 따른 3차원 구조의 광검출 소자의 각도( $\Psi$ )에 따른 해제된 사전-변형률을 도출하기 위한 FEA 및 분석 예측 결과를 도시한 그래프이다.

도 6a는 본 발명의 실시예에 따른 3차원 구조의 광검출 소자를 해제된 사전-변형률의 함수로서 높이를 고려한 FEA 및 분석적 예측 결과를 도시한 그래프이고, 도 6b는 본 발명의 실시예에 따른 3차원 구조의 광검출 소자의 중간 단계의 기계적 조립 및 최종 기계적 조립(mechanical assembly) 상태를 도시한 이미지이다.

도 7a는 팔각 프리즘 형상의 본 발명의 실시예에 따른 3차원 구조의 광검출 소자를 바닥에서 바라보았을 때(bottom view)의 최대 주 변형률(maximum principal strain)을 도시한 이미지이고, 도 7b는 팔각 뿔의 본 발명의 실시예에 따른 3차원 구조의 광검출 소자를 바닥에서 바라보았을 때의 최대 주 변형률을 도시한 이미지이며, 도 7c는 반구의 본 발명의 실시예에 따른 3차원 구조의 광검출 소자를 바닥에서 바라보았을 때의 최대 주 변형률을 도시한 이미지이다.

도 8은 본 발명의 실시예에 따른 3차원 구조의 광검출 소자의 인터커넥션(interconnect)의 변형률 프로파일을 도시한 그래프이다.

도 9a는 본 발명의 실시예에 따른 3차원 구조의 광검출 소자의 문턱 값(threshold value)에 따른 인터커넥션의 면적 비율(areal proportion)을 도시한 그래프이고, 도 9b는 0.25%의 문턱 값을 갖는 본 발명의 실시예에 따른 3차원 구조의 광검출 소자를 도시한 이미지이며, 도 9c는 0.83%의 문턱 값을 갖는 본 발명의 실시예에 따른 3차원 구조의 광검출 소자를 도시한 이미지이고, 도 9d는 1.5%의 문턱 값을 갖는 본 발명의 실시예에 따른 3차원 구조의 광검출 소자를 도시한 이미지이다.

도 10은 플랫폼 그래핀/제1 및 제2 기재로 구성된 인터커넥션을 포함하는 본 발명의 실시예에 따른 3차원 구조의 광검출 소자 및 버클드 그래핀 제1 및 제2 기재로 구성된 인터커넥션을 포함하는 본 발명의 실시예에 따른 3차원 구조의 광검출 소자의 전류-전압(I-V) 특성을 도시한 그래프이다.

도 11은 -20mV 내지 2mV의 저전압 범위에서의 본 발명의 실시예에 따른 3차원 구조의 광검출 소자에 포함되는 광저항기의 전류-전압(I-V) 특성을 도시한 그래프이다.

도 12는 서로 다른 레이저 전력 밀도에 특정된 본 발명의 실시예에 따른 3차원 구조의 광검출 소자에 포함되는 광저항기의 암전(dark) 및 조명(illuminated) 상태의 전류비를 도시한 그래프이다.

도 13은 실리콘 산화물( $\text{SiO}_2$ )의 제1 및 제2 기재를 포함하는 본 발명의 실시예에 따른 3차원 구조의 광검출 소자에 포함되는 광저항기 및 SU-8의 제1 및 제2 기재를 포함하는 본 발명의 실시예에 따른 3차원 구조의 광검출 소자에 포함되는 광저항기의 시간-해상해상도 광반응성(time-resolved photoresponse) 결과를 도시한 그래프이다.

다.

도 14a는 제1 보호층 및 제2 보호층을 포함하는 본 발명의 실시예에 따른 3차원 구조의 광검출 소자에 포함되는 광저항기의 투과전자현미경(transmission electron microscope) 측정 이미지를 도시한 것이다.

도 15는 본 발명의 실시예에 따른 3차원 구조의 광검출 소자의 안정성 테스트 결과를 도시한 그래프이다.

도 16a는 본 발명의 실시예에 따른 3차원 구조의 광검출 소자의 주사전자현미경(SEM) 측정 이미지이고, 도 16b는 본 발명의 실시예에 따른 3차원 구조의 광검출 소자의 5X5 어레이의 주사전자현미경(SEM) 측정 이미지이다.

도 17은 비과괴적인 변형률에 따른 본 발명의 실시예에 따른 3차원 구조의 광검출 소자의 주사전자현미경(SEM) 측정 이미지이다.

도 18a 내지 도 18d는 상이한 평면 내 2축 연신 상태(different in-plane biaxial stretching states)에 따른 본 발명의 실시예에 따른 3차원 구조의 광검출 소자의 주사전자현미경(SEM) 측정 이미지이다.

도 19는 본 발명의 실시예에 따른 3차원 구조의 광검출 소자의 파장(Wavelength)에 따른 투과율(Transmittance)을 도시한 스펙트럼이다.

도 20a는 입사 레이저 빔의 위치와 방향을 식별하는 본 발명의 실시예에 따른 3차원 구조의 광검출 소자를 도시한 광학 사진이고, 도 20b는 입사 레이저 빔의 위치와 방향을 식별하는 본 발명의 실시예에 따른 3차원 구조의 광검출 소자의 사진 이미지, 광반응성(photoresponse) 및 세기 분포(intensity distribution)를 도시한 것이며, 도 20c는 광의 산란을 증가시키기 위한 의도적인 조건(intentional condition)을 도식화한 것이다.

도 21a 및 도 21b는 다양한 입사각으로 레이저 빔이 입사되는 본 발명의 실시예에 따른 3차원 구조의 광검출 소자를 도시한 이미지이다.

도 22는 본 발명의 실시예에 따른 3차원 구조의 광검출 소자의 광전류 맵을 도시한 그래프이다.

도 23a는  $0^\circ$ 에서  $25^\circ$ 의 편각(polar angle,  $\phi$ )이 검출 가능한 본 발명의 실시예에 따른 3차원 구조의 광검출 소자를 도시한 개략도이고, 도 23b는  $45^\circ$ 의 최대 감지 방위각(azimuthal angle,  $\Theta$ )을 갖는 본 발명의 실시예에 따른 3차원 구조의 광검출 소자를 도시한 개략도이다.

도 24는 본 발명의 실시예에 따른 3차원 구조의 광검출 소자에 포함되는 광저항기 사이의 거리의 관계를 도시한 이미지이다.

도 25는 레이저 빔 지름(beam diameter)에 따른 본 발명의 실시예에 따른 3차원 구조의 광검출 소자의 정확도를 측정한 결과를 도시한 이미지이다.

도 26은 고주파(High frequency)에 따른 본 발명의 실시예에 따른 3차원 구조의 광검출 소자의 정확도를 측정한 결과를 도시한 이미지이다.

도 27a는 화학적 기상 증착(CVD)법으로 성장된 단층 이황화 몰리브덴( $\text{MoS}_2$ )의 라만 스펙트럼(Raman spectrum)을 도시한 그래프이고, 도 27b는 이중층 그래핀의 라만 스펙트럼을 도시한 그래프이다.

### 발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

[0044] 이하 첨부 도면들 및 첨부 도면들에 기재된 내용들을 참조하여 본 발명의 실시예를 상세하게 설명하지만, 본 발명이 실시예에 의해 제한되거나 한정되는 것은 아니다.

[0045] 본 명세서에서 사용된 용어는 실시예들을 설명하기 위한 것이며 본 발명을 제한하고자 하는 것은 아니다. 본 명세서에서, 단수형은 문구에서 특별히 언급하지 않는 한 복수형도 포함한다. 명세서에서 사용되는 "포함한다(comprises)" 및/또는 "포함하는(comprising)"은 언급된 구성요소, 단계, 동작 및/또는 소자는 하나 이상의 다른 구성요소, 단계, 동작 및/또는 소자의 존재 또는 추가를 배제하지 않는다.

[0046] 본 명세서에서 사용되는 "실시예", "예", "측면", "예시" 등은 기술된 임의의 양상(aspect) 또는 설계가 다른 양상 또는 설계들보다 양호하다거나, 이점이 있는 것으로 해석되어야 하는 것은 아니다.

[0047] 또한, '또는'이라는 용어는 배타적 논리합 'exclusive or'이기보다는 포함적인 논리합 'inclusive or'를 의미한다. 즉, 달리 언급되지 않는 한 또는 문맥으로부터 명확하지 않는 한, 'x가 a 또는 b를 이용한다'라는 표현은 포함적인 자연 순열들(natural inclusive permutations) 중 어느 하나를 의미한다.



- [0048] 또한, 본 명세서 및 청구항들에서 사용되는 단수 표현("a" 또는 "an")은, 달리 언급하지 않는 한 또는 단수 형태에 관한 것이라고 문맥으로부터 명확하지 않는 한, 일반적으로 "하나 이상"을 의미하는 것으로 해석되어야 한다.
- [0049] 아래 설명에서 사용되는 용어는, 연관되는 기술 분야에서 일반적이고 보편적인 것으로 선택되었으나, 기술의 발달 및/또는 변화, 관례, 기술자의 선호 등에 따라 다른 용어가 있을 수 있다. 따라서, 아래 설명에서 사용되는 용어는 기술적 사상을 한정하는 것으로 이해되어서는 안 되며, 실시예들을 설명하기 위한 예시적 용어로 이해되어야 한다.
- [0050] 또한, 특정한 경우는 출원인이 임의로 선정한 용어도 있으며, 이 경우 해당되는 설명 부분에서 상세한 그 의미를 기재할 것이다. 따라서 아래 설명에서 사용되는 용어는 단순한 용어의 명칭이 아닌 그 용어가 가지는 의미와 명세서 전반에 걸친 내용을 토대로 이해되어야 한다.
- [0051] 한편, 제1, 제2 등의 용어는 다양한 구성 요소들을 설명하는데 사용될 수 있지만, 구성 요소들은 용어들에 의하여 한정되지 않는다. 용어들은 하나의 구성 요소를 다른 구성 요소로부터 구별하는 목적으로만 사용된다.
- [0052] 또한, 막, 층, 영역, 구성 요청 등의 부분이 다른 부분 "위에" 또는 "상에" 있다고 할 때, 다른 부분의 바로 위에 있는 경우뿐만 아니라, 그 중간에 다른 막, 층, 영역, 구성 요소 등이 개재되어 있는 경우도 포함한다.
- [0053] 다른 정의가 없다면, 본 명세서에서 사용되는 모든 용어(기술 및 과학적 용어를 포함)는 본 발명이 속하는 기술 분야에서 통상의 지식을 가진 자에게 공통적으로 이해될 수 있는 의미로 사용될 수 있을 것이다. 또 일반적으로 사용되는 사전에 정의되어 있는 용어들은 명백하게 특별히 정의되어 있지 않는 한 이상적으로 또는 과도하게 해석되지 않는다.
- [0054] 한편, 본 발명을 설명함에 있어서, 관련된 공지 기능 또는 구성에 대한 구체적인 설명이 본 발명의 요지를 불필요하게 흐릴 수 있다고 판단되는 경우에는, 그 상세한 설명을 생략할 것이다. 그리고, 본 명세서에서 사용되는 용어(terminology)들은 본 발명의 실시예를 적절히 표현하기 위해 사용된 용어들로서, 이는 사용자, 운용자의 의도 또는 본 발명이 속하는 분야의 관례 등에 따라 달라질 수 있다. 따라서, 본 용어들에 대한 정의는 본 명세서 전반에 걸친 내용을 토대로 내려져야 할 것이다.
- [0055] 이하에서는 도 1을 참조하여 본 발명의 실시예에 따른 3차원 구조의 광검출 소자에 대해 설명하기로 한다.
- [0057] 도 1은 본 발명의 실시예에 따른 3차원 구조의 광검출 소자의 2차원 광검출 구조체, 본 발명의 실시예에 따른 3차원 구조의 광검출 소자의 평면도 및 측면도를 도시한 도면이다.
- [0058] 본 발명의 실시예에 따른 3차원 구조의 광검출 소자는 중앙 영역에 형성되는 베이스부(base part; 110), 베이스부(110)의 둘레에 형성된 제1 절곡부(first bending part; 121), 제1 절곡부(121)를 통해 베이스부(110)에 연결되는 적어도 하나의 가지부(branch part; 130), 적어도 하나의 가지부(130)에 형성된 제2 절곡부(second bending part; 122), 제2 절곡부(122)를 통해 적어도 하나의 가지부(130)에 연결되는 본딩부(bonding part; 140)를 포함한다.
- [0059] 또한, 본 발명의 실시예에 따른 3차원 구조의 광검출 소자는 베이스부(110) 및 가지부(130) 중 적어도 어느 하나의 표면에 형성되는 적어도 하나의 광저항기(photoresistor) 및 본딩부(140)가 부착되는 연신 기판을 포함하고, 본딩부(140)는 베이스부(110)가 연신 기판의 두께 방향으로 갭(gap)을 갖도록 연신 기판에 부착된다.
- [0060] 또한, 본 발명의 실시예에 따른 3차원 구조의 광검출 소자는 적어도 하나의 광저항기를 이용하여 광의 이동 방향을 추적(tracking)할 수 있다.
- [0061] 바람직하게는, 본 발명의 실시예에 따른 3차원 구조의 광검출 소자에 포함되는 적어도 하나의 광저항기는 3차원 구조의 광검출 소자로 입사되는 입사광의 입사 위치(entry point)를 검출하고, 입사광이 3차원 구조의 광검출 소자를 통과하여 3차원 구조의 광검출 소자로부터 출사되는 출사 위치(exit point)를 검출하여 입사광의 이동 방향을 추적할 수 있다.
- [0062] 보다 구체적으로, 본 발명의 실시예에 따른 3차원 구조의 광검출 소자는 높은 투과도를 갖고, 3차원 구조로 형성되기 때문에 입사광이 본 발명의 실시예에 따른 3차원 구조의 광검출 소자를 통과하여 출사될 수 있다.
- [0063] 따라서, 본 발명의 실시예에 따른 3차원 구조의 광검출 소자는 입사광이 입사되면 입사광이 입사되는 위치에 형

성된 적어도 하나의 광저항기에서 입사광의 입사 위치를 검출하고, 입사광이 본 발명의 실시예에 따른 3차원 구조의 광검출 소자를 통과하여 출사되면, 입사광이 출사되는 위치에 형성된 적어도 하나의 광저항기가 입사광의 출사 위치를 검출하여 입사광의 이동 방향을 추적할 수 있고, 광의 발산각(divergence angle) 또한 측정할 수 있다.

[0064] 또한, 본 발명의 실시예에 따른 3차원 구조의 광검출 소자는 높은 광투과도를 갖는 2차원 물질인 그래핀과 2차원 전이금속 칼코겐 화합물을 이용하여 광저항기의 전극들 및 채널을 제조함으로써, 광이 본 발명의 실시예에 따른 3차원 구조의 광검출 소자의 적어도 하나의 광저항기 통과하여 광의 입사 위치 및 출사 위치를 용이하게 검출하여 광의 방향 또는 발산각을 측정할 수 있다.

[0065] 또한, 본 발명의 실시예에 따른 3차원 구조의 광검출 소자는 베이스부(110) 및 가지부(130) 중 적어도 어느 하나의 표면에 형성되는 적어도 하나의 광저항기를 이용하여 본 발명의 실시예에 따른 3차원 구조의 광검출 소자에 입사되는 입사광의 강도를 측정할 수 있다.

[0066] 따라서, 본 발명의 실시예에 따른 3차원 구조의 광검출 소자는 태양 추적(solar tracking), 레이저 레이더(laser radar) 또는 신흥 광전자 기술(emerging optoelectronic technologies)에 사용될 수 있다.

[0067] 본 발명의 실시예에 따른 3차원 구조의 광검출 소자에 대해서는 본 발명의 실시예에 따른 3차원 구조의 광검출 소자의 제조 방법을 이용하여 보다 상세히 설명하기로 한다.

[0068] 본 발명의 실시예에 따른 3차원 구조의 광검출 소자의 제조 방법은 지지 기판 상에 제1 기재를 코팅하는 단계를 포함한다.

[0069] 지지 기판은 제1 기재를 지지하는 역할을 하며, 제1 지지 기판을 지지할 수 있다면 물질은 특별히 제한되지 않으나, 바람직하게는, 지지 기판으로 실리콘/실리콘 산화물(Si/SiO<sub>2</sub>)이 사용될 수 있다.

[0070] 제1 기재는 투명한 고분자 물질이 사용될 수 있고, 예를 들면, 투명한 고분자 물질은 SU-8, 포토레지스트, PET(polyethylene terephthalate), PEN(polyethylene naphthalate), PES(polyether sulfone), PI(polyimide), PAR(polyarylate), PC(polycarbonate), COC(cycloolefin copolymer), 폴리디메틸실로세인, UV 경화 수지 및 열경화 수지 중 적어도 어느 하나를 포함할 수 있다.

[0071] 바람직하게는, 제1 기재는 포토레지스트 또는 SU-8이 사용될 수 있고, 더욱 바람직하게는 제1 기재는 SU-8이 사용될 수 있다. SU-8은 에폭시 기반 네거티브 포토레지스트이고, 네거티브 포토레지스트는 노광 시, 광이 조사되지 않은 부분이 현상에 의해 제거되는 레지스트를 의미한다.

[0072] 본 발명의 실시예에 따른 3차원 구조의 광검출 소자는 제1 기재로 SU-8을 사용함으로써, 제1 기재의 두께를 용이하게 조절할 수 있고, 제1 절곡부(121) 및 제2 절곡부(122)에 대응되는 제1 기재의 두께를 조절함으로써, 스트레인(strain)이 가해졌을 때 크랙과 같은 물리적 손상없이 용이하게 3차원 구조의 광검출 소자를 자가 조립(중이 접기와 유사)시킬 수 있다.

[0073] 제1 기재는 블레이드 코팅(blade coating), 바코팅(bar coating), 스프레이 코팅(spray coating), 스핀 코팅(spin coating), 브러쉬 코팅(brush coating), 딥 코팅(dip coating) 및 그라비아 코팅(gravure coating) 중 적어도 하나의 방법으로 형성될 수 있다.

[0074] 바람직하게는, 제1 기재는 지지 기판 상에 제1 기재를 형성하기 위한 용액을 이용한 스핀 코팅에 의해 형성될 수 있고, 스핀 코팅은 지지 기판 상에 제1 기재를 형성하기 위한 용액을 일정량 떨어뜨리고 지지 기판을 고속으로 회전시켜서 제1 기재를 형성하기 위한 용액에 가해지는 원심력으로 코팅하는 방법이다.

[0075] 본 발명의 실시예에 따른 3차원 구조의 광검출 소자의 제조 방법은 스핀 코팅을 이용하여 제1 기재를 형성함으로써, 증착 공정에 비하여 생산 비용을 절감시킬 수 있고, 공정 기술의 단순화를 통하여 공정 비용 및 공정 시간을 감소시킬 수 있다.

[0076] 본 발명의 실시예에 따른 3차원 구조의 광검출 소자의 제조 방법은 제1 기재를 베이스부(110), 제1 절곡부(121), 적어도 하나의 가지부(130), 제2 절곡부(122) 및 본딩부(140)와 대응되도록 패터닝하는 단계를 포함한다.

[0077] 베이스부(110), 제1 절곡부(121), 적어도 하나의 가지부(130), 제2 절곡부(122) 및 본딩부(140)는 제1 기재 상에 베이스부(110), 제1 절곡부(121), 적어도 하나의 가지부(130), 제2 절곡부(122) 및 본딩부(140)과 대응되는

패턴을 형성한 후, 제1 기재를 선택적으로 식각, 즉, 패터닝함으로써 형성될 수 있다.

- [0078] 본 발명의 실시예에 따른 3차원 구조의 광검출 소자의 제조 방법은 제1 기재로 포토리소그래피가 가능한 물질을 사용하므로써, 별도로 포토레지스트를 도포하기 위한 공정이 생략되어 공정 기술의 단순화를 통하여 공정 비용 및 공정 시간을 감소시킬 수 있다.
- [0079] 본 발명의 실시예에 따른 3차원 구조의 광검출 소자의 제조 방법은 패터닝된 제1 기재의 베이스부(110) 및 가지부(130) 중 적어도 어느 하나의 표면에 적어도 하나의 광저항기를 형성하는 단계를 포함한다.
- [0080] 본 발명의 실시예에 따른 3차원 구조의 광검출 소자는 베이스부(110) 및 가지부(130) 중 적어도 어느 하나의 표면에 적어도 하나의 광저항기를 포함한다.
- [0081] 본 발명의 실시예에 따른 3차원 구조의 광검출 소자는 적어도 하나의 광저항기를 이용하여 광의 이동 방향을 추적(tracking)할 수 있다.
- [0082] 보다 구체적으로, 본 발명의 실시예에 따른 3차원 구조의 광검출 소자는 베이스부(110), 제1 절곡부(121), 적어도 하나의 가지부(130), 제2 절곡부(122) 및 본딩부(140)를 이용하여 3차원 구조로 형성되기 때문에, 입사광이 입사되면 입사광이 입사되는 위치에 형성된 적어도 하나의 광저항기에서 입사광의 입사 위치를 검출하고, 입사광이 본 발명의 실시예에 따른 3차원 구조의 광검출 소자를 통과하여 출사되면, 입사광이 출사되는 위치에 형성된 적어도 하나의 광저항기가 입사광의 출사 위치를 검출하여 입사광의 이동 방향을 추적할 수 있고, 광의 발산 각 또한 측정할 수 있다.
- [0083] 또한, 본 발명의 실시예에 따른 3차원 구조의 광검출 소자는 높은 광투과도를 갖는 2차원 물질인 그래핀과 2차원 전이금속 칼코겐 화합물을 이용하여 광저항기의 전극들 및 채널을 제조함으로써, 광이 본 발명의 실시예에 따른 3차원 구조의 광검출 소자의 적어도 하나의 광저항기 통과하여 광의 입사 위치 및 출사 위치를 검출할 수 있다.
- [0084] 적어도 하나의 광저항기의 구조 및 형성 방법에 대해서는 도 2a 및 도 2b에서 보다 상세히 설명하기로 한다.
- [0085] 본 발명의 실시예에 따른 3차원 구조의 광검출 소자의 제조 방법은 적어도 어느 하나의 광저항기가 형성된 패터닝된 제1 기재 상에 제2 기재를 형성하는 단계를 포함한다.
- [0086] 제2 기재는 적어도 어느 하나의 광저항기를 포함하는 패터닝된 제1 기재, 즉, 적어도 어느 하나의 광저항기, 베이스부(110), 제1 절곡부(121), 적어도 하나의 가지부(130), 제2 절곡부(122) 및 본딩부(140) 상에 전체적으로 제2 기재가 형성될 수 있다.
- [0087] 제2 기재는 제1 기재와 대응되는 패턴으로 형성될 수 있고, 따라서, 적어도 어느 하나의 광저항기, 베이스부(110), 제1 절곡부(121), 적어도 하나의 가지부(130), 제2 절곡부(122) 및 본딩부(140)는 제1 기재 및 제2 기재에 의해 샌드위치 구조를 가질 수 있다.
- [0088] 제2 기재는 투명한 고분자 물질이 사용될 수 있고, 예를 들면, 투명한 고분자 물질은 SU-8, 포토레지스트, PET(polyethylene terephthalate), PEN(polyethylene naphthalate), PES(polyether sulfone), PI(polyimide), PAR(polyarylate), PC(polycarbonate), COC(cycloolefin copolymer), 폴리디메틸실로세인, UV 경화 수지 및 열경화 수지 중 적어도 어느 하나를 포함할 수 있다.
- [0089] 바람직하게는, 제2 기재는 포토레지스트 또는 SU-8이 사용될 수 있고, 더욱 바람직하게는 제2 기재는 SU-8이 사용될 수 있다. SU-8은 에폭시 기반 네거티브 포토레지스트이고, 네거티브 포토레지스트는 노광 시, 광이 조사되지 않은 부분이 현상에 의해 제거되는 레지스트를 의미한다.
- [0090] 본 발명의 실시예에 따른 3차원 구조의 광검출 소자는 제2 기재로 SU-8을 사용함으로써, 제2 기재의 두께를 용이하게 조절할 수 있고, 제2 기재의 두께를 조절함으로써, 보다 구체적으로, 제1 절곡부(121) 및 제2 절곡부(122)의 두께를 조절함으로써, 스트레인(strain)이 가해졌을 때 크랙과 같은 물리적 손상 없이 용이하게 제1 절곡부(121) 및 제2 절곡부(122)를 밴딩(bending)시킬 수 있다.
- [0091] 제2 기재는 블레이드 코팅(blade coating), 바코팅(bar coating), 스프레이 코팅(spray coating), 스핀 코팅(spin coating), 브러쉬 코팅(brush coating), 딥 코팅(dip coating) 및 그라비아 코팅(gravure coating) 중 적어도 하나의 방법으로 형성될 수 있다.
- [0092] 바람직하게는, 제2 기재는 지지 기판 상에 제2 기재를 형성하기 위한 용액을 이용한 스핀 코팅에 의해 형성될

수 있고, 스핀 코팅은 지지 기판 상에 제2 기재를 형성하기 위한 용액을 일정량 떨어뜨리고 지지 기판을 고속으로 회전시켜서 제2 기재를 형성하기 위한 용액에 가해지는 원심력으로 코팅하는 방법으로, 스핀 코팅을 이용하면 증착 공정에 비하여 생산 비용을 절감시킬 수 있고, 공정 기술의 단순화를 통하여 공정 비용 및 공정 시간을 감소시킬 수 있다.

- [0093] 본 발명의 실시예에 따른 3차원 구조의 광검출 소자의 제조 방법은 제1 기재로부터 지지 기판을 분리하는 단계를 포함한다.
- [0094] 지지 기판은 레이저 리프트 오프 및 화학적 식각 중 적어도 어느 하나를 이용하여 제1 기재로부터 분리될 수 있다.
- [0095] 지지 기판을 화학적 식각으로 분리하는 경우, HF와 같은 식각 용액을 이용하여 지지 기판에 형성되어 있는 희생층을 제거함으로써, 분리될 수 있다.
- [0096] 또한, 지지 기판을 레이저를 이용하여 분하는 경우, 지지 기판에 레이저를 조사하면 레이저가 조사된 지지 기판이 열팽창되며, 이후, 열팽창된 지지 기판을 냉각하여 수축시킴으로써, 지지 기판이 열팽창과 수축을 반복하여 제1 기재로부터 분리시킬 수 있다.
- [0097] 또한, 레이저는 균일한 세기의 빔을 출력하므로 항상 균일한 열을 인가할 수 있고, 레이저빔은 스폿(spot)을 원하는 크기로 조절할 수 있기 때문에 국부적인 위치에만 열을 인가하여 지지 기판을 분리시킬 수 있다.
- [0098] 본 발명의 실시예에 따른 3차원 구조의 광검출 소자의 제조 방법은 제1 절곡부(121) 및 제2 절곡부(122)에 대응하는 제1 기재 및 제2 기재 중 적어도 어느 하나에 오프닝부(opening portion)를 형성하고, 2차원 광검출 구조체를 수득하는 단계를 포함한다.
- [0099] 오프닝부는 밴딩되는 방향에 따라 제1 기재 또는 제2 기재 상에 선택적으로 형성될 수 있다.
- [0100] 본 발명의 실시예에 따른 3차원 구조의 광검출 소자는 3차원 구조로 조립될 때, 제1 절곡부(121) 및 제2 절곡부(122)가 밴딩(bending)될 수 있고, 밴딩 시, 제1 기재, 적어도 어느 하나의 광저항기 및 제2 기재에서 발생하는 물리적 손상을 방지하기 위해 제1 절곡부(121) 및 제2 절곡부(122)에 오프닝부를 형성하여 제1 절곡부(121) 및 제2 절곡부(122)에 집중되는 스트레스를 분산시킬 수 있다.
- [0101] 따라서, 제1 절곡부(121) 및 제2 절곡부(122)의 두께는 베이스부(110)의 두께 또는 가지부(130)의 두께보다 상대적으로 얇을 수 있다.
- [0102] 또한, 본 발명의 실시예에 따른 3차원 구조의 광검출 소자는 제2 기재로 포토리소그래피가 가능한 물질을 사용하므로, 포토리소그래피 공정에 의해 용이하게 오프닝부를 형성할 수 있다.
- [0103] 제1 절곡부(121) 및 제2 절곡부(122)에 형성되는 오프닝부의 형상 및 개수는 특별히 제한되지 않고, 제1 기재 또는 제2 기재의 두께 또는 사이즈에 따라서 다양하게 조절될 수 있다.
- [0104] 따라서, 본 발명의 실시예에 따른 3차원 구조의 광검출 소자의 제조 방법은 적어도 어느 하나의 광저항기, 베이스부(110), 제1 절곡부(121), 적어도 하나의 가지부(130), 제2 절곡부(122) 및 본딩부(140)가 제1 기재 및 제2 기재에 의해 샌드위치된 2차원 광검출 구조체(101)를 수득할 수 있다.
- [0105] 실시예에 따라, 본 발명의 실시예에 따른 3차원 구조의 광검출 소자의 제조 방법은 제1 기재 및 제2 기재 중 적어도 어느 하나에 형성된 오프닝부에 포토레지스트(photoresist, PR)를 도포하는 단계를 더 포함할 수 있다.
- [0106] 따라서, 본 발명의 실시예에 따른 3차원 구조의 광검출 소자의 제조 방법은 오프닝부를 포토레지스트(photoresist, PR)로 채움으로써, 제1 또는 제2 기재를 평탄화시켜 추후 공정 핸들링 특성을 향상시킬 수 있다.
- [0107] 또한, 오프닝부에 채워진 포토레지스트는 추후(예; 부착 공정)에 제거될 수 있다.
- [0108] 실시예에 따라, 2차원 광검출 구조체(101)를 수득하는 단계는, 2차원 구조의 광검출 구조체(101) 상에 제1 자외선/오존(UV/O<sub>3</sub>) 처리를 진행하는 단계를 더 포함할 수 있다.
- [0109] 바람직하게는, 연신 기판에 부착되는 2차원 구조의 광검출 구조체(101)의 표면에 제1 자외선/오존(UV/O<sub>3</sub>) 처리가 진행될 수 있다.
- [0110] 제1 자외선/오존(UV/O<sub>3</sub>) 처리는 2차원 광검출 구조체(101) 표면을 친수성으로 개질시킬 수 있고, 보다 구체적으로



로는, 제1 자외선/오존(UV/O<sub>3</sub>) 처리는 자외선/오존 처리기를 이용하여 2차원 광검출 구조체(101) 표면을 친수성으로 개질시킴으로써, 2차원 광검출 구조체(101)의 표면을 -OH, -OOH 또는 -OO- 등으로 치환시켜, 수접촉각을 감소시킬 수 있다.

[0111] 따라서, 제1 자외선/오존(UV/O<sub>3</sub>) 처리는 2차원 광검출 구조체(101)의 표면과 후속 공정에서 부착되는 연신 기관의 표면 접합성을 향상시킬 수 있다.

[0112] 또한, 제1 자외선/오존(UV/O<sub>3</sub>) 처리의 오존 농도는 시간에 따라 증가하기 때문에, 2차원 광검출 구조체(101)은 자외선/오존 처리기가 동작하고 20분 내지 30분 후에 자외선 처리될 수 있다.

[0113] 제1 자외선/오존(UV/O<sub>3</sub>) 처리는 20분 내지 30분 동안 진행될 수 있고, 제1 자외선/오존(UV/O<sub>3</sub>) 처리 시간이 20분 미만이면 자외선 처리가 충분히 진행되지 않아 2차원 광검출 구조체(101) 표면의 수접촉각이 충분히 낮아지지 않는 문제가 있고, 30분을 초과하면 2차원 광검출 구조체(101) 표면의 수접촉각이 더 이상 작아지지 않기 때문에 수율이 낮아지는 문제가 있다.

[0114] 제1 자외선/오존(UV/O<sub>3</sub>) 처리의 시간은 이에 제한되지 않고, 사용되는 연신 기관의 수접촉각에 따라 자외선 처리 시간이 조절될 수 있다.

[0115] 바람직하게는, 제1 자외선/오존(UV/O<sub>3</sub>) 처리는 20분이상 진행하는 경우 수접촉각이 더 이상 작아지지 않기 때문에 20분 처리 공정을 최적조건으로 사용할 수 있으나, 2차원 광검출 구조체(101)의 표면에 유기물 이물질이 많은 경우 유기물을 오존을 사용하여 제거하기 위해 더 긴 시간이 필요할 수도 있기 때문에 2차원 광검출 구조체(101)의 상황에 따라 20분에서 30분 동안 자외선 오존 처리를 진행할 수 있다.

[0116] 또한, 실시예에 따라, 본 발명의 본 발명의 실시예에 따른 3차원 구조의 광검출 소자는 연신 기관 상에 적어도 하나 이상의 2차원 광검출 구조체(101)를 포함할 수 있다.

[0117] 본 발명의 실시예에 따른 3차원 구조의 광검출 소자의 제조 방법은 연신 기관을 연신시켜 신장 상태를 형성하는 단계를 포함한다.

[0118] 연신 기관은 3차원 구조의 광검출 소자(102)를 제조하고, 3차원 구조의 광검출 소자(102)를 지지하기 위한 기관으로서, 신축성(elasticity)을 갖는 기관 일 수 있다.

[0119] 연신 기관은 엘라스토머성 실리콘(Elastomeric silicone), 엘라스토머성 폴리우레탄(Elastomeric polyurethane), 엘라스토머성 폴리이소프렌(Elastomeric polyisoprene) 및 엘라스토머성 우레탄아크릴레이트(Elastomeric urethane acrylate) 중 적어도 어느 하나를 포함할 수 있고, 바람직하게는, 연신 기관은 폴리디메틸실록산(Polydimethylsiloxane; PDMS), 폴리에스테르(Polyester), 폴리우레탄(polyurethane; PU), 폴리우레탄아크릴레이트(polyurethane acrylate; PUA), 폴리페닐메틸실록산(polyphenylmethylsiloxane), 헥사메틸디실록산(hexamethyldisiloxane), 폴리비닐알코올(polyvinyl alcohol; PVA)에폭시 수지(epoxy resine) 및 에코플렉스(ecoflex) 중 적어도 어느 하나를 포함할 수 있다.

[0120] 연신 기관은 투명한 재질 또는 불투명한 재질로 형성될 수 있다.

[0121] 또한, 실시예에 따라, 연신 기관을 연신시켜 신장 상태를 형성하기 전에, 연신 기관 상에 제2 자외선/오존(UV/O<sub>3</sub>) 처리를 진행하는 단계를 더 포함할 수 있다.

[0122] 바람직하게는, 제2 자외선/오존(UV/O<sub>3</sub>) 처리는 2차원 광검출 구조체(101)가 부착되는 면에 진행될 수 있다.

[0123] 제2 자외선/오존(UV/O<sub>3</sub>) 처리는 연신 기관 표면을 친수성으로 개질시킬 수 있고, 보다 구체적으로는, 제2 자외선/오존(UV/O<sub>3</sub>) 처리는 자외선/오존 처리기를 이용하여 연신 기관 표면을 친수성으로 개질시킴으로써, 연신 기관의 표면을 -OH, -OOH 또는 -OO- 등으로 치환시켜, 수접촉각을 감소시킬 수 있다.

[0124] 따라서, 제2 자외선/오존(UV/O<sub>3</sub>) 처리는 연신 기관의 표면과 후속 공정에서 부착되는 2차원 광검출 구조체(101) 간의 표면 접합성을 향상시킬 수 있다.

[0125] 또한, 제2 자외선/오존(UV/O<sub>3</sub>) 처리의 오존 농도는 시간에 따라 증가하기 때문에, 연신 기관은 자외선/오존 처리기가 동작하고 20분 내지 30분 후에 자외선 처리될 수 있다.

- [0126] 제2 자외선/오존(UV/O<sub>3</sub>) 처리는 20분 내지 30분 동안 진행될 수 있고, 제2 자외선/오존(UV/O<sub>3</sub>) 처리 시간이 20분 미만이면 자외선 처리가 충분히 진행되지 않아 연신 기관 표면의 수접촉각이 충분히 낮아지지 않는 문제가 있고, 30분을 초과하면 연신 기관 표면의 수접촉각이 더 이상 작아지지 않기 때문에 수율이 낮아지는 문제가 있다.
- [0127] 제2 자외선/오존(UV/O<sub>3</sub>) 처리의 시간은 이에 제한되지 않고, 사용되는 연신 기관의 수접촉각에 따라 자외선 처리 시간이 조절될 수 있다.
- [0128] 바람직하게는, 제2 자외선/오존(UV/O<sub>3</sub>) 처리는 20분이상 진행하는 경우 수접촉각이 더 이상 작아지지 않기 때문에 20분 처리 공정을 최적조건으로 사용할 수 있으나, 연신 기관의 표면에 유기물 이물질이 많은 경우 유기물을 오존을 사용하여 제거하기 위해 더 긴 시간이 필요할 수도 있기 때문에 연신 기관의 상황에 따라 20분에서 30분 동안 자외선 오존 처리를 진행할 수 있다.
- [0129] 본 발명의 실시예에 따른 3차원 구조의 광검출 소자의 제조 방법은 신장 상태의 연신 기관 상에 2차원 광검출 구조체를 부착시키는 단계를 포함한다.
- [0130] 2차원 광검출 구조체(101)는 폴리디메틸실록산(PDMS)의 플랫 슬래브(flat slab)를 이용하여 수용성 테이프에 전사시킨 다음, 2차원 광검출 구조체(101)가 부착된 수용성 테이프를 신장 상태의 연신 기관에 부착시킨 후, 수용성 테이프를 물을 이용하여 제거할 수 있다.
- [0131] 수용성 테이프로는 폴리비닐알콜(PVA)이 사용될 수 있다.
- [0132] 연신 기관 및 2차원 광검출 구조체(101)는 접착되는 각각의 접착면에 제1 자외선/오존(UV/O<sub>3</sub>) 처리 및 제2 자외선/오존(UV/O<sub>3</sub>) 처리가 진행되었기 때문에, 연신 기관 및 2차원 광검출 구조체(101)의 접착면의 결합 에너지가 증가하여 용이하게 연신 기관 및 2차원 광검출 구조체(101)를 부착시킬 수 있다.
- [0133] 본 발명의 실시예에 따른 3차원 구조의 광검출 소자의 제조 방법은 연신 기관으로부터 베이스부(110), 제1 절곡부(121), 적어도 하나의 가지부(130) 및 제2 절곡부(122)의 결합을 약화시키는 단계를 포함한다.
- [0134] 본 발명의 실시예에 따른 3차원 구조의 광검출 소자의 제조 방법은 연신 기관의 연신/미연신 상태를 이용하여 2차원 광검출 구조체(101)를 3차원 구조의 광검출 소자(102)로 제조하기 때문에 연신된 연신 기관에 부착되는 본딩부(140)를 제외한 베이스부(110), 제1 절곡부(121), 적어도 하나의 가지부(130) 및 제2 절곡부(122)의 결합 에너지를 감소시켜야 한다.
- [0135] 따라서, 연신 기관에 부착되는 2차원 광검출 구조체(101)의 제1 기재(또는 제2 기재)의 제1 절곡부(121), 적어도 하나의 가지부(130) 및 제2 절곡부(122)에 아세톤 처리를 진행하여 결합 에너지를 감소시키거나, 일부 박리시켜 연신 기관에 부착되는 제1 절곡부(121), 적어도 하나의 가지부(130) 및 제2 절곡부(122)의 결합 에너지를 감소시킬 수 있다.
- [0136] 본 발명의 실시예에 따른 3차원 구조의 광검출 소자의 제조 방법은 연신 기관의 신장 상태를 해제하여 2차원 광검출 구조체를 3차원 구조로 자가-조립(self-assembly)시키는 단계를 포함한다.
- [0137] 본 발명의 실시예에 따른 3차원 구조의 광검출 소자의 제조 방법은 연신 기관이 신장 상태인 경우, 신장 상태의 연신 기관 표면에 2차원 광검출 구조체(101)의 본딩부(140)가 부착되어 있는 2차원 평면 구조를 갖지만, 연신 기관의 신장 상태를 해제된 비신장 상태인 경우, 신장되었던 연신 기관이 원래 상태로 복원되기 때문에 2차원 광검출 구조체(101)의 제1 절곡부(121) 및 제2 절곡부(122)가 밴딩되면서 3차원 구조의 광검출 소자(102)로 자가-조립될 수 있다.
- [0138] 따라서, 본 발명의 실시예에 따른 3차원 구조의 광검출 소자의 제조 방법은 별도의 장비 없이 연신 기관을 이용하여 용이하게 3차원 구조의 광검출 소자(102)를 제조할 수 있다.
- [0139] 3차원 구조의 광검출 소자(102)는 3차원 구조의 광검출 소자(102)의 두께, 각도 또는 디자인과 같은 파라미터 또는 연신 기관의 신장 정도를 조절하여 최대 내구성 한계를 제어함으로써, 굽힘 또는 비틀림으로 인한 변형률(strain)에 따른 기계적 열화를 방지할 수 있다.
- [0140] 본 발명의 실시예에 따른 3차원 구조의 광검출 소자(102)의 베이스부(140)와 연신 기관 사이의 갭(h), 제1 절곡부(121) 및 제2 절곡부(122)의 너비 비(W<sub>1</sub>/W<sub>0</sub>) 또는 베이스부(140)와 연신 기관 사이의 각도(Ψ)는 제1 기재

또는 제2 기재의 크기나 디자인을 변경하여 제어될 수 있다.

- [0141] 예를 들면, 본 발명의 실시예에 따른 3차원 구조의 광검출 소자(102)는 자가-조립에 의해 베이스부(140)와 연신 기관 사이의 갭이 1.4mm의 높이(h)를 가질 수 있으나, 이에 제한되지 않고, 베이스부(140)와 연신 기관 사이의 갭은 측정하고자 하는 광(예; 레이저 빔)의 범위에 따라 달라질 수 있다.
- [0142] 예를 들면, 본 발명의 실시예에 따른 3차원 구조의 광검출 소자(102)를 팔각 기둥으로 제조하고자 하는 경우, 베이스부(140)와 연신 기관 사이의 각도( $\Psi$ )는  $90^\circ$  일 수 있고, 반구형 돔으로 제조하고자 하는 경우,  $90^\circ$  이하의 각도를 가질 수 있으며, 베이스부(140)와 연신 기관 사이의 각도( $\Psi$ )가  $180^\circ$  에 근접할수록 본 발명의 실시예에 따른 3차원 구조의 광검출 소자(102)는 이상적인 형태의 구체로 제조될 수 있으나, 이에 제한되지 않는다.
- [0143] 또한, 본 발명의 실시예에 따른 3차원 구조의 광검출 소자(102)는 측정하고자 하는 광(예; 레이저 빔)에 따라 3차원 구조의 광검출 소자(102)의 크기를 다양하게 조절할 수 있다.
- [0144] 또한, 본 발명의 실시예에 따른 3차원 구조의 광검출 소자(102)는 제1 기재 상에 형성되는 광저항기 또는 연신 기관 상에 형성되는 3차원 구조의 광검출 소자(102)의 수를 조절하여 측정하고자 하는 광(예; 레이저 빔)의 측정 범위를 제어할 수 있다.
- [0145] 따라서, 소자의 크기 제한으로 인해 측정하고자 하는 광의 측정 범위가 제한되는 경우, 본 발명의 실시예에 따른 3차원 구조의 광검출 소자(102)의 크기, 광검출 소자(102) 수, 광검출 소자(102)의 디자인, 광저항층의 크기, 광저항층의 수, 광저항층의 디자인, 제1 기재의 두께 및 제2 기재의 두께 중 적어도 어느 하나를 조절하여 광의 측정 범위를 다양하게 제어할 수 있다.
- [0146] 본 발명의 실시예에 따른 3차원 구조의 광검출 소자(102)는 다양한 구조의 3차원 형상을 가질 수 있다.
- [0147] 본 발명의 실시예에 따른 3차원 구조의 광검출 소자(102)의 형상은 3차원 유한 요소 분석법(3D Finite element analyses; 3D FEA) 기술을 이용하여 최적화될 수 있다.
- [0148] 또한, 본 발명의 실시예에 따른 3차원 구조의 광검출 소자(102)는 3차원 구조 및 연신 기관으로 인해 스트레칭, 밴딩 또는 트위스트와 같은 기계적 변형물에도 안정적으로 동작될 수 있다.
- [0149] 또한, 본 발명의 본 발명의 실시예에 따른 3차원 구조의 광검출 소자는 연신 기관 상에 적어도 하나 이상의 2차원 광검출 구조체(101)를 포함할 수 있기 때문에, 연신 기관 상에 적어도 하나 이상의 3차원 구조의 광검출 소자(102)가 형성된 3차원 구조의 광검출 소자 어레이를 제조할 수 있다.
- [0150] 따라서, 본 발명의 실시예에 따른 3차원 구조의 광검출 소자를 포함하는 3차원 구조의 광검출 소자 어레이는 광검출 정밀도를 보다 향상시킬 수 있다.
- [0151] 도 2a 및 도 2b를 참조하여 본 발명의 실시예에 따른 3차원 구조의 광검출 소자에 포함되는 광저항기에 대해 설명하기로 한다.
- [0153] 도 2a는 본 발명의 실시예에 따른 3차원 구조의 광검출 소자의 입체도 및 3차원 구조의 광검출 소자에 포함되는 광저항기의 단면도를 도시한 것이다.
- [0154] 본 발명의 실시예에 따른 3차원 구조의 광검출 소자에 포함되는 광저항기(photoresistor)는 실시예에 따른 3차원 구조의 광검출 소자와 일부 동일한 구성요소를 포함하고 있으므로, 동일한 구성요소에 대한 설명은 생략하기로 한다.
- [0155] 광저항기(200)는 제1 기재(210) 상에 형성되고, 서로 이격되는 제1 전극(221) 및 제2 전극(222), 제1 기재(210) 상에 형성되고, 제1 전극(221) 및 제2 전극(222) 사이에 배치되는 2차원 전이금속 칼코겐 화합물(2D Transition Metal Dichalcogenides) 채널(230) 및 제1 전극(221), 제2 전극(222) 및 2차원 전이금속 칼코겐 화합물 채널(230)이 형성된 제1 기재(210) 상에 형성되는 제2 기재(220)를 포함할 수 있다.
- [0156] 본 발명의 실시예에 따른 3차원 구조의 광검출 소자는 제1 전극(221), 제2 전극(222) 및 채널(230)로 2차원 물질을 사용함으로써, 포토리소그래피에 대한 적용성이 뛰어나고, 기계적 특성 또한 매우 뛰어나 높은 변형률에서도 안정적인 특성을 나타낼 수 있다.
- [0157] 따라서, 본 발명의 실시예에 따른 3차원 구조의 광검출 소자는 높은 외부 변형률에 의해서도 안정적인 특성을

나타내기 때문에 많은 변형물을 요구하는 분야에 적용 될 수 있다.

- [0158] 이하에서는 본 발명의 실시예에 따른 3차원 구조의 광검출 소자에 포함되는 광저항기의 구조에 대해 광저항기의 제조 방법으로 보다 상세히 설명하기로 한다.
- [0159] 본 발명의 실시예에 따른 3차원 구조의 광검출 소자에 포함되는 광저항기의 제조 방법은 패터닝된 제1 기재(210)의 베이스부 및 가지부 중 적어도 어느 하나의 표면에 서로 이격되는 제1 전극(221) 및 제2 전극(222)을 형성하는 단계를 포함한다.
- [0160] 본 발명의 실시예에 따른 3차원 구조의 광검출 소자에 포함되는 광저항기의 제조 방법은 제1 전극(221) 및 제2 전극(222)을 형성하기 전에, 패터닝된 제1 기재(210) 상에 제1 보호층을 형성하는 단계를 더 포함할 수 있다.
- [0161] 제1 보호층은 수분이나 산소로 인해 광저항기가 손상되는 것을 보호할 수 있다.
- [0162] 제1 보호층은 알루미늄 산화물( $Al_2O_3$ ), 실리콘 산화물( $SiO_2$ ), 실리콘 산질화물( $SiON$ ), 하프늄 산화물( $HfO_x$ ), 지르코늄 산화물( $ZrO_2$ ), 마그네슘 산화물( $MgO$ ), 티타늄 산화물( $TiO_2$ ), 아연 산화물( $ZnO$ ), 텅스텐 산화물( $WO_3$ ), tantalum 산화물( $Ta_2O_5$ ), 니오븀 산화물( $Nb_2O_5$ ), 이트륨 산화물( $Y_2O_3$ ), 세륨 산화물( $CeO_2$ ), 란타넘 산화물( $La_2O_3$ ), 에르븀 산화물( $Er_2O_3$ ), 하프늄 알루미늄 산화물( $HfAlO$ ), 하프늄 실리콘 산화물( $HfSiO$ ), 지르코늄 실리콘 산화물( $ZrSiO$ ), 지르코늄 알루미늄 산화물( $ZrAlO$ ), 하프늄 산질화물( $HfON$ ), 하프늄 실리콘 산질화물( $HfSiON$ ), 실리콘 질화물( $SiN_x$ ), SiBN(silicon boron nitride) 및 h-BN(hexagonal-boron nitride) 중 적어도 어느 하나를 포함할 수 있으나, 이에 제한되지 않고, 패턴과 두께 조절이 가능한 물질이 사용될 수 있다.
- [0163] 또한, 제1 보호층의 물질은 이에 제한되지 않고, 폴리에틸렌테레프탈레이트, 폴리불화비닐리덴, 폴리메틸 메타크릴레이트 및 폴리이미드 중 적어도 어느 하나를 포함하는 고분자 재료 박막을 포함할 수 있다.
- [0164] 바람직하게는, 제1 보호층은 알루미늄 산화물( $Al_2O_3$ )을 포함할 수 있다.
- [0165] 제1 보호층은 진공 증착법(vacuum deposition), 화학 기상 증착법(chemical vapor deposition), 물리 기상 증착법(physical vapor deposition), 원자층 증착법(atomic layer deposition), 유기금속 화학 증착법(Metal Organic Chemical Vapor Deposition), 플라즈마 화학 증착법(Plasma-Enhanced Chemical Vapor Deposition), 분자선 성장법(Molecular Beam Epitaxy), 수소화물 기상 성장법(Hydride Vapor Phase Epitaxy), 스퍼터링(Sputtering), 스핀 코팅(spin coating), 딥 코팅(dip coating) 및 존 캐스팅(zone casting) 중 적어도 하나의 방법을 이용하여 형성될 수 있다.
- [0166] 제1 보호층에 대해서는 도 3a 내지 도 4b에서 보다 상세히 설명하기로 한다.
- [0167] 제1 기재(210) 또는 제2 기재(240)는 SU-8를 포함할 수 있고, 제1 기재(210)는 스핀 코팅에 의해 형성될 수 있다.
- [0168] 제1 전극(221) 및 제2 전극(222)은 2차원 물질인 그래핀(graphene)을 포함할 수 있다. 또한, 제1 전극(221) 및 제2 전극(222)은 각지형 구조를 가질 수 있다.
- [0169] 제1 전극(221) 및 제2 전극(222)은 제1 기재(210) 상에 그래핀을 증착하거나 전사시켜 형성할 수 있고, 환원된 산화 그래핀을 사용할수도 있다.
- [0170] 또한, 제1 전극(221) 및 제2 전극(222)은 단층 또는 다층으로 형성할 수 있고, 제1 기재(210)상에 그래핀을 직접 성장시켜 제1 전극(221) 및 제2 전극(222)형성할수도 있다.
- [0171] 본 발명의 실시예에 따른 3차원 구조의 광검출 소자에 포함되는 광저항기의 제조 방법은 패터닝된 제1 기재(210)의 베이스부 및 가지부 중 적어도 어느 하나의 표면에 형성되고, 제1 전극(221) 및 제2 전극(222) 사이에 배치되는 2차원 전이금속 칼코겐 화합물 채널(230)을 형성하는 단계를 포함한다.
- [0172] 2차원 전이금속 칼코겐 화합물 채널(230)은 일레로, 스카치테이프(Scotch Tape)를 이용한 물리적인 박리를 통하여 형성될 수 있고, 이외에 층상구조 사이에 산 등을 삽입하여 떼어내는 화학적 박리, 유기 용매에 분산시켜 떼어내는 액상 박리, 물리적인 증착, 수열 합성, 전기화학적 합성, 산화(Molybdenum)의 황화, 황을 포함하는 전구체의 열분해 또는 그래핀의 합성 방법과 같은 기상화학적증착(CVD)법을 이용하여 형성될 수 있다.
- [0173] 2차원 전이금속 칼코겐 화합물 채널(230)은 이황화 몰리브덴(Molybdenum Disulfide,  $MoS_2$ ), 이셀레니드 몰리브



텐(Molybdenum Diselenide,  $\text{MoSe}_2$ ), 이황화 텅스텐(ungsten Disulfide,  $\text{WS}_2$ ), 이셀레니드 텅스텐(Tungsten Diselenide,  $\text{WSe}_2$ ), 이텔루리드 텅스텐(Tungsten Ditelluride,  $\text{WTe}_2$ ), 이텔루리드 몰리브덴(Molybdenum Ditelluride,  $\text{MoTe}_2$ ), 이셀레니드 주석(Tin Diselenide,  $\text{SnSe}_2$ ), 이황화 지르코늄(zirconium Disulfide,  $\text{ZrS}_2$ ), 이셀레니드 지르코늄(zirconium Diselenide,  $\text{ZrSe}_2$ ), 이황화 하프늄(hafnium Disulfide,  $\text{HfS}_2$ ), 이셀레니드 하프늄(hafnium Diselenide,  $\text{HfSe}_2$ ), 이셀레니드 니오븀(niobium Diselenide,  $\text{NbSe}_2$ ) 및 이셀레니드 레늄(rhenium Diselenide,  $\text{ReSe}_2$ ) 중 적어도 어느 하나를 포함할 수 있으나, 이에 제한되지 않고, 다양한 이차원 물질이 사용될 수 있다.

- [0174] 바람직하게는, 2차원 전이금속 칼코겐 화합물 채널(230)로 1.9eV의 다이렉트 밴드갭(direct band gap)을 갖는 이황화 몰리브덴(Molybdenum Disulfide,  $\text{MoS}_2$ )이 사용될 수 있다.
- [0175] 실시예에 따라, 본 발명의 실시예에 따른 3차원 구조의 광검출 소자에 포함되는 광저항기의 제조 방법은 제1 전극(221), 제2 전극(222) 및 2차원 전이금속 칼코겐 화합물 채널(230)이 형성된 패터닝된 제1 기재(210) 상에 제2 보호층을 형성하는 단계를 더 포함할 수 있다.
- [0176] 제2 보호층은 수분이나 산소로 인해 광저항기(200)가 손상되는 것을 보호할 수 있다.
- [0177] 제2 보호층은 알루미늄 산화물( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), 실리콘 산화물( $\text{SiO}_2$ ), 실리콘 산질화물( $\text{SiON}$ ), 하프늄 산화물( $\text{HfO}_x$ ), 지르코늄 산화물( $\text{ZrO}_2$ ), 마그네슘 산화물( $\text{MgO}$ ), 티타늄 산화물( $\text{TiO}_2$ ), 아연 산화물( $\text{ZnO}$ ), 텅스텐 산화물( $\text{WO}_3$ ), tantalum 산화물( $\text{Ta}_2\text{O}_5$ ), 니오븀 산화물( $\text{Nb}_2\text{O}_5$ ), 이트륨 산화물( $\text{Y}_2\text{O}_3$ ), 세륨 산화물( $\text{CeO}_2$ ), 란타넘 산화물( $\text{La}_2\text{O}_3$ ), 에르븀 산화물( $\text{Er}_2\text{O}_3$ ), 하프늄 알루미늄 산화물( $\text{HfAlO}$ ), 하프늄 실리콘 산화물( $\text{HfSiO}$ ), 지르코늄 실리콘 산화물( $\text{ZrSiO}$ ), 지르코늄 알루미늄 산화물( $\text{ZrAlO}$ ), 하프늄 산질화물( $\text{HfON}$ ), 하프늄 실리콘 산질화물( $\text{HfSiON}$ ), 실리콘 질화물( $\text{SiN}_x$ ), SiBN(silicon boron nitride) 및 h-BN(hexagonal-boron nitride) 중 적어도 어느 하나를 포함할 수 있으나, 이에 제한되지 않고, 패턴과 두께 조절이 가능한 물질이 사용될 수 있다.
- [0178] 또한, 제2 보호층의 물질이 이에 제한되지 않고, 폴리에틸렌테레프탈레이트, 폴리불화비닐리덴, 폴리메틸 메타크릴레이트 및 폴리이미드 중 적어도 어느 하나를 포함하는 고분자 재료 박막을 포함할 수 있다.
- [0179] 바람직하게는, 제2 보호층은 알루미늄 산화물( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )을 포함할 수 있다.
- [0180] 제2 보호층은 진공 증착법(vacuum deposition), 화학 기상 증착법(chemical vapor deposition), 물리 기상 증착법(physical vapor deposition), 원자층 증착법(atomic layer deposition), 유기금속 화학 증착법(Metal Organic Chemical Vapor Deposition), 플라즈마 화학 증착법(Plasma-Enhanced Chemical Vapor Deposition), 분자선 성장법(Molecular Beam Epitaxy), 수소화물 기상 성장법(Hydride Vapor Phase Epitaxy), 스퍼터링(Sputtering), 스핀 코팅(spin coating), 딥 코팅(dip coating) 및 존 캐스팅(zone casting) 중 적어도 하나의 방법을 이용하여 형성될 수 있다.
- [0181] 제2 보호층에 대해서는 도 3a 내지 도 4b에서 보다 상세히 설명하기로 한다.
- [0182] 본 발명의 실시예에 따른 3차원 구조의 광검출 소자에 포함되는 광저항기의 제조 방법은 제1 전극(221), 제2 전극(222) 및 2차원 전이금속 칼코겐 화합물 채널(230)이 형성된 패터닝된 제1 기재(210) 상에 제2 기재(240)를 형성하는 단계를 포함한다.
- [0183] 바람직하게는, 제2 기재(240)는 SU-8를 포함할 수 있고, 제2 기재(240)은 스핀 코팅에 의해 형성될 수 있다.
- [0184] 따라서, 본 발명의 실시예에 따른 3차원 구조의 광검출 소자에 포함되는 광저항기의 제조 방법에 의해 제조된 광저항기(200)는 제1 전극(221), 제2 전극(222) 및 채널(230)로 2차원 물질을 사용함으로써, 포토리소그래피에 대한 적용성이 뛰어나고, 얇은 원자 두께에 의해 기계적 특성 또한 매우 뛰어나 높은 변형률에서도 안정적인 특성을 나타낼 수 있다.
- [0185] 또한, 광저항기(200)의 구조는 이에 제한되지 않고, 실시예에 따라, 광저항기(200)는, 제1 기재(210) 상에 형성되고, 서로 이격되는 제1 전극(221) 및 제2 전극(222), 제1 기재(210) 상에 형성되고, 제1 전극(221) 및 제2 전극(222) 사이에 배치되는 p-type 2차원 전이금속 칼코겐 화합물 및 n-type 2차원 전이금속 칼코겐 화합물 및 제1 전극(221), 제2 전극(222), p-type 2차원 전이금속 칼코겐 화합물 및 n-type 2차원 전이금속 칼코겐 화합물

이 형성된 제1 기재(210) 상에 형성되는 제2 기재(240)를 포함할 수 있다.

- [0186] 제1 전극(221) 및 제2 전극(222) 사이에 형성되는 n-type 2차원 전이금속 칼코겐 화합물 및 p-type 2차원 전이금속 칼코겐 화합물을 포함하는 PN 다이오드는 n-type 2차원 전이금속 칼코겐 화합물과 p-type 2차원 전이금속 칼코겐 화합물이 수평 방향으로 나란히 형성된 수평 구조이거나, n-type 2차원 전이금속 칼코겐 화합물과 p-type 2차원 전이금속 칼코겐 화합물이 적층된 수직 구조일 수 있다.
- [0187] 또한, 광저항기(200)는 헤테로 P-N 접합(hetero P-N junction) 구조 또는 호모 P-N 접합(homo P-N junction) 구조일 수 있다.
- [0188] 헤테로 P-N 접합 구조를 갖는 광저항기(200)의 경우, 제1 전극(221) 및 제2 전극(222) 사이에 이종의 n-type 2차원 전이금속 칼코겐 화합물 및 p-type 2차원 전이금속 칼코겐 화합물을 포함할 수 있다.
- [0189] n-type 2차원 전이금속 칼코겐 화합물로는 이황화 몰리브덴(Molybdenum Disulfide,  $\text{MoS}_2$ ) 또는 이황화 텅스텐(Tungsten Disulfide,  $\text{WS}_2$ )이 사용될 수 있고, p-type 2차원 전이금속 칼코겐 화합물로는 이셀레니드 텅스텐(Tungsten Diselenide,  $\text{WSe}_2$ ) 또는 이텔루리드 몰리브덴(Molybdenum Ditetelluride,  $\text{MoTe}_2$ ) 이 사용될 수 있으나, 이에 제한되지는 않는다.
- [0190] 호모 P-N 접합 구조를 갖는 광저항기(200)의 경우, 2차원 전이금속 칼코겐 화합물 채널(230)의 적어도 일부분을 n-type 도펀트 또는 p-type 도펀트로 도핑 처리하여 형성된 n-type 2차원 전이금속 칼코겐 화합물 및 p-type 2차원 전이금속 칼코겐 화합물을 포함할 수 있다.
- [0191] p-type 도펀트나 n-type 도펀트는 이온주입(ion implantation)이나 화학적 도핑(chemical doping) 방식으로 도핑될 수 있다.
- [0192] p-type 도펀트의 소스로는  $\text{NO}_2\text{BF}_4$ ,  $\text{NOBF}_4$ ,  $\text{NO}_2\text{SbF}_6$  등의 이온성 액체(ionic liquid),  $\text{HCl}$ ,  $\text{H}_2\text{PO}_4$ ,  $\text{CH}_3\text{COOH}$ ,  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{HNO}_3$  등의 산류 화합물(acidic compound), 디클로로디시아노퀴논(dichlorodicyanoquinone)(DDQ), 옥손(oxone), 디미리스토일포스파티딜이노시톨(dimyristoylphosphatidylinositol)(DMPI), 트리플루오로메탄술포이미드(trifluoromethanesulfoneimide) 등의 유기 화합물(organic compound) 등을 사용할 수 있다. 또는, p-type 도펀트의 소스로  $\text{HPtCl}_4$ ,  $\text{AuCl}_3$ ,  $\text{HAuCl}_4$ ,  $\text{AgOTf}$ (silver trifluoromethanesulfonate),  $\text{AgNO}_3$ ,  $\text{H}_2\text{PdCl}_6$ ,  $\text{Pd}(\text{OAc})_2$ ,  $\text{Cu}(\text{CN})_2$  등의 물질을 사용할 수 있다.
- [0193] n-type 도펀트의 소스로는 치환 또는 비치환된 니코틴아미드의 환원물(a reduction product of a substituted or unsubstituted nicotinamide); 치환 또는 비치환된 니코틴아미드와 화학적으로 결합된 화합물의 환원물(a reduction product of a compound which is chemically bound to a substituted or unsubstituted nicotinamide); 및 두 개 이상의 피리디늄 유도체를 포함하고 하나 이상의 피리디늄 유도체의 질소가 환원된 화합물(a compound comprising at least two pyridinium moieties in which a nitrogen atom of at least one of the pyridinium moieties is reduced) 등을 사용할 수 있다.
- [0194] 예컨대, n-type 도펀트의 소스는 NMNH(nicotinamide mononucleotide-H), NADH(nicotinamide adenine dinucleotide-H), NADPH(nicotinamide adenine dinucleotide phosphate-H)를 포함하거나, 비올로겐(viologen)을 포함할 수 있다. n-type 도펀트의 소스는 PEI(polyethylenimine) 등의 폴리머를 포함할 수 있다. 또는, n-type 도펀트는 K, Li 등의 알칼리 금속을 포함할 수 있다.
- [0195] 그러나, p-type 도펀트와 n-type 도펀트 물질(소스)은 예시적인 것으로, 이에 제한되지 않고, 그 밖에 다양한 물질이 사용될 수 있다.
- [0196] 또한, 본 발명의 실시예에 따른 3차원 구조의 광검출 소자는 각 영역별(베이스부, 가지부(①), 본딩부(②) 또는 인터커넥션)로 상이한 층 구조로 형성될 수 있다.
- [0197] 도 2a를 참조하면, 본 발명의 실시예에 따른 3차원 구조의 광검출 소자의 가지부(①)는 광저항기를 포함하나, 제1 절곡부, 제2 절곡부(②) 및 본딩부(②)는 광저항기를 포함하지 않는다. 또한, 본 발명의 실시예에 따른 3차원 구조의 광검출 소자를 외부와 연결하는 인터커넥션부(③)도에도 광저항기를 포함하지 않는다.
- [0198] 따라서, 제1 절곡부, 제2 절곡부, 본딩부(②) 및 인터커넥션부(③)는 제1 기재(210), 제1 전극(221) 또는 제2 전극(222) 및 제2 기재(240)를 포함하기는 하나, 2차원 전이금속 칼코겐 화합물 채널(230)을 포함하지는

않는다.

- [0199] 보다 구체적으로, 제1 절곡부, 제2 절곡부(②) 및 본딩부(②)를 형성하는 공정은, 가지부(①)의 광저항기를 형성하는 공정에서 2차원 전이금속 칼코겐 화합물 채널(230)을 형성하는 공정을 제외한 다른 공정을 동일하게 진행될 수 있다.
- [0200] 또한, 제1 절곡부 및 제2 절곡부(②)는 2차원 광검출 구조체의 밴딩을 유도하기 위한 오프닝부(OP)가 형성될 수 있고, 따라서, 제1 절곡부의 두께 및 제2 절곡부(②)의 두께(T1)는 베이스부의 두께 또는 가지부(T2)의 두께보다 상대적으로 얇을 수 있다.
- [0201] 오프닝부(OP)는 사용자의 선택에 따라, 제1 기재(210) 및 제2 기재(240) 중 적어도 어느 하나에 형성될 수 있다. 또한, 오프닝부(OP)가 형성되는 위치는 밴딩되는 방향에 따라 선택적으로 형성될 수 있다.
- [0203] 도 2b는 본 발명의 실시예에 따른 3차원 구조의 광검출 소자에 포함되는 광저항기의 밴드갭 에너지를 도시한 도면이다.
- [0204] 도 2b를 참조하면, 본 발명의 실시예에 따른 3차원 구조의 광검출 소자에 포함되는 광저항기의 전자(검은색) 및 정공(회색)은 광이 입사되면 바이어스 전압(bias voltage)으로 인해 광전류를 발생시킬 수 있다.
- [0205] 실선은 가전자대(EV) 및 전도대(EC)를 나타내고, 파선(dashed line)은 페르미 준위를 나타낸다.
- [0206] 또한, 문턱 전압이 0을 초과( $V_{DS}>0$ )하는 경우, 정공은 가전자대 방향으로 이동(회색 화살표)하고, 전자는 전도대 방향으로 이동(검은색 화살표)으로 이동하게 된다.
- [0208] 도 3a 내지 도 3c는 제1 보호층 또는 제2 보호층을 포함하는 광저항기를 도시한 단면도이다.
- [0209] 도 3a 내지 도 3c는 도 2a에 도시된 본 발명의 실시예에 따른 3차원 구조의 광검출 소자에 포함되는 광저항기와 동일한 구성요소를 포함하고 있으므로, 동일한 구성요소에 대해서는 생략하기로 한다.
- [0210] 도 3a는 제1 보호층 및 제2 보호층을 포함하지 않는 본 발명의 실시예에 따른 3차원 구조의 광검출 소자에 포함되는 광저항기를 도시한 단면도이고, 도 3b는 제1 보호층만 포함하는 본 발명의 실시예에 따른 3차원 구조의 광검출 소자에 포함되는 광저항기를 도시한 단면도이며, 도 3c는 제1 보호층 및 제2 보호층을 포함하는 본 발명의 실시예에 따른 3차원 구조의 광검출 소자에 포함되는 광저항기를 도시한 단면도이다.
- [0211] 도 3b 및 도 3c를 참조하면, 본 발명의 실시예에 따른 3차원 구조의 광검출 소자에 포함되는 광저항기는 제2 기재(240)의 하면에 제1 보호층(251)을 포함하거나, 제1 기재(210)의 상면에 제2 보호층(252)을 포함하거나, 제2 기재(240)의 하면에 형성되는 제1 보호층(251) 및 제1 기재의 상면에 형성되는 제2 보호층(252)을 모두 포함할 수 있다.
- [0212] 바람직하게는, 본 발명의 실시예에 따른 3차원 구조의 광검출 소자에 포함되는 광저항기는 제1 보호층(251) 및 제2 보호층(252)이 2차원 전이금속 칼코겐 화합물 채널(230), 제1 전극(221) 및 제2 전극(222)를 모두 덮도록 캡슐화하여 광에 대한 반응을 약 20배 정도 향상시킬 수 있다.
- [0213] 보다 구체적으로, 제1 보호층(251) 및 제2 보호층(252)은 2차원 전이금속 칼코겐 화합물 채널(230)의 표면 거칠기를 감소시키고, 깨끗하며 컴포털한 접촉을 제공하여 2차원 전이금속 칼코겐 화합물 채널(230) 계면의 트랩을 감소시킬 수 있다.
- [0214] 또한, 제1 보호층(251) 및 제2 보호층(252)로 하이-k 유전체 물질을 사용하여 2차원 전이금속 칼코겐 화합물 채널(230)과 제1 보호층(251) 및 제2 보호층(252) 간의 큰 유전체 불일치는 제공함으로써, 2차원 전이금속 칼코겐 화합물 채널(230) 계면에서의 쿨롱성 불순물을 억제하고 전송 중인 캐리어 트랩을 감소시킬 수 있다.
- [0215] 따라서, 제1 보호층(251) 및 제2 보호층(252)을 포함하는 광저항기를 포함하는 본 발명의 실시예에 따른 3차원 구조의 광검출 소자는 광에 따른 캐리어 전송이 빨라져 응답 속도가 향상될 수 있다.
- [0216] 제1 보호층(251) 및 제2 보호층(252)은 알루미늄 산화물( $Al_2O_3$ ), 실리콘 산화물( $SiO_2$ ), 실리콘 산질화물( $SiON$ ), 하프늄 산화물( $HfO_x$ ), 지르코늄 산화물( $ZrO_2$ ), 마그네슘 산화물( $MgO$ ), 티타늄 산화물( $TiO_2$ ), 아연 산화물( $ZnO$ ),

텅스텐 산화물( $\text{WO}_3$ ), 탄탈륨 산화물( $\text{Ta}_2\text{O}_5$ ), 니오븀 산화물( $\text{Nb}_2\text{O}_5$ ), 이트륨 산화물( $\text{Y}_2\text{O}_3$ ), 세륨 산화물( $\text{CeO}_2$ ), 란타넘 산화물( $\text{La}_2\text{O}_3$ ), 에르븀 산화물( $\text{Er}_2\text{O}_3$ ), 하프늄 알루미늄 산화물( $\text{HfAlO}$ ), 하프늄 실리콘 산화물( $\text{HfSiO}$ ), 지르코늄 실리콘 산화물( $\text{ZrSiO}$ ), 지르코늄 알루미늄 산화물( $\text{ZrAlO}$ ), 하프늄 산질화물( $\text{HfON}$ ), 하프늄 실리콘 산질화물( $\text{HfSiON}$ ), 실리콘 질화물( $\text{SiN}_x$ ), SiBN(silicon boron nitride) 및 h-BN(hexagonal-boron nitride) 중 적어도 어느 하나를 포함할 수 있으나, 이에 제한되지 않고, 패턴과 두께 조절이 가능한 물질이 사용될 수 있다.

[0217] 또한, 제1 보호층(251) 및 제2 보호층(252)의 물질은 이에 제한되지 않고, 폴리에틸렌테레프탈레이트, 폴리불화비닐리덴, 폴리메틸 메타크릴레이트 및 폴리이미드 중 적어도 어느 하나를 포함하는 고분자 재료 박막을 포함할 수 있다.

[0218] 바람직하게는 제1 보호층(251) 및 제2 보호층(252)은 알루미늄 산화물( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )을 포함할 수 있다.

[0219] 하이-k 유전체(high-k dielectric)인 알루미늄 산화물은 계면 트랩 전하(interface trap charge) 및 조도를 감소시키고, 깨끗한 계면을 형성하여, 계면의 낮은 거칠기(roughness)에 의해 쿨롱성 불순물(Coulombic impurities)를 효과적으로 억제시킬 수 있다.

[0220] 제1 보호층(251) 및 제2 보호층(252)은 진공 증착법(vacuum deposition), 화학 기상 증착법(chemical vapor deposition), 물리 기상 증착법(physical vapor deposition), 원자층 증착법(atomic layer deposition), 유기 금속 화학 증착법(Metal Organic Chemical Vapor Deposition), 플라즈마 화학 증착법(Plasma-Enhanced Chemical Vapor Deposition), 분자선 성장법(Molecular Beam Epitaxy), 수소화물 기상 성장법(Hydride Vapor Phase Epitaxy), 스퍼터링(Sputtering), 스핀 코팅(spin coating), 딥 코팅(dip coating) 및 존 캐스팅(zone casting) 중 적어도 하나의 방법을 이용하여 형성될 수 있다.

[0222] 도 4a 및 도 4b는 제1 보호층 및 제2 보호층을 포함하는 본 발명의 실시예에 따른 3차원 구조의 광검출 소자에 포함되는 광저항기의 반응을 도시한 단면도이다.

[0223] 도 4a 및 도 4c는 도 2a에 도시된 본 발명의 실시예에 따른 3차원 구조의 광검출 소자에 포함되는 광저항기와 동일한 구성요소를 포함하고 있으므로, 동일한 구성요소에 대해서는 생략하기로 한다.

[0224] 도 4a를 참조하면, 제1 보호층(251) 및 제2 보호층(252)을 포함하지 않는 광저항기는 물( $\text{H}_2\text{O}$ ) 분자 및 산소( $\text{O}_2$ ) 분자가 2차원 전이금속 칼코겐 화합물 채널(230) 계면에 트랩(trap)되게 되는데, 물( $\text{H}_2\text{O}$ ) 분자 및 산소( $\text{O}_2$ ) 분자가 2차원 전이금속 칼코겐 화합물 채널(230) 계면에 트랩되면, 2차원 전이금속 칼코겐 화합물 채널(230)의 캐리어가 감소(deplete)되는 문제가 있다.

[0225] 그러나, 도 4b에서와 같이, 제1 보호층(251) 및 제2 보호층(252)을 포함하는 광저항기는 2차원 전이금속 칼코겐 화합물 채널(230), 제1 전극(221) 및 제2 전극(222)을 캡슐화하는 하이-k 유전체(high-k dielectric)의 제1 보호층(251) 및 제2 보호층(252)을 형성하기 때문에, 물( $\text{H}_2\text{O}$ ) 분자 및 산소( $\text{O}_2$ ) 분자에 의해 2차원 전이금속 칼코겐 화합물 채널(230) 계면에서 캐리어가 트랩되는 것을 억제하여 광에 대한 반응을 대폭 향상시킬 수 있다.

## [0227] 제조예

### [0228] 2차원 물질 제조

[0229] 단층 그래핀 및 이황화 몰리브덴( $\text{MoS}_2$ )은 구리 호일(Cu foil) 및 Si/ $\text{SiO}_2$  웨이퍼 상에 성장되고, 각각 저압화학 기상증착(low pressure chemical vapor deposition, LPCVD) 및 유기금속화학증착(metalorganic chemical vapor deposition, MOCVD)에 의해 성장된다.

[0230] 구리 호일( $16 \times 8 \text{ cm}^2$ )을 원형 석영 튜브에 넣고  $\text{H}_2$  가스(8sccm)를 80mTorr로 2h 시간 동안  $1000^\circ\text{C}$ 에서 열적 어닐링을 진행하고, 챔버에 1.6Torr의  $\text{CH}_4$  전구체 가스(20 sccm)를 1h 동안 주입하였다. 이어서, 석영 튜브(가열 구역)를 초기에는 빠른 속도로 자연 냉각시키고,  $\text{H}_2$  가스(8sccm)의 존재 하의 80mTorr에서 실온으로 서서히 상승시켰다.



- [0231] 이황화 몰리브덴( $\text{MoS}_2$ )을 성장시키기 위한 몰리브덴(Mo) 및 황(S)의 전구체로 각각 몰리브덴 헥사카르보닐(molybdenum hexacarbonyl, MHC) 및 디메틸 설파이드(dimethyl sulfide, DMS)를 사용하였다.
- [0232] 이 후,  $\text{H}_2$  가스(10sccm)와 Ar(300sccm)과 함께 MOCVD 석영 튜브에 기상 MHC(0.5sccm) 및 DMS(1sccm)를 주입하고, 석영 튜브를 7.5Torr 에서 550℃로 20시간 동안 가열하였다.
- [0233] 단층 그래핀은 LPCVD를 사용하여 이황화 몰리브덴과 동일한 방법으로 제조되었다.

[0235] **2차원 물질의 전사 공정**

- [0236] 그래핀 상부에 이황화 몰리브덴 전사 공정 동안 지지체로 사용되는 폴리메틸메타크릴레이트(Polymethyl methacrylate, PMMA)를 스핀 코팅(타면은 산소 플라즈마에 의해 에칭된다)하였다. PMMA가 코팅된 그래핀/구리 호일(PMMA-coated graphene/Cu foil)을 과황산 암모늄(ammonium persulfate, APS) 용액(20g/l)에 5시간동안 부유(floating)시켜 구리 호일을 식각하고, PMMA 코팅된 그래핀(PMMA-coated graphene)을 탈이온수에 여러 번 부유(floating)시켜 APS 잔여물을 세척하였다. 마지막으로, 그래핀을 원하는 웨이퍼로 전사하고, PMMA를 아세톤을 이용하여 제거하였다.
- [0237] 이황화 몰리브덴은 하기 공정을 제외하면 단층 그래핀과 동일한 방법으로 전사되었다.
- [0238] 이황화 몰리브덴의 경우, PMMA-코팅된 이황화 몰리브덴  $\text{SiO}_2/\text{Si}$  웨이퍼(PMMA-coated  $\text{MoS}_2$   $\text{SiO}_2/\text{Si}$  wafer)를 희석된 불산(HF) 용액(1%)에 부유(floating)시켜  $\text{SiO}_2$ 를 식각하였다.
- [0239] 이 후, PMMA-코팅된 이황화 몰리브덴(PMMA-coated  $\text{MoS}_2$ )을 탈이온수에 여러 번 부유(floating)시켜 불산(HF) 잔여물을 세척하였다.

[0241] **3차원 구조의 광검출 소자 제조**

- [0242] Si/ $\text{SiO}_2$  상에 SU-8를 스핀 코팅하여 2 $\mu\text{m}$ 의 제1 기재를 형성한 다음, 팔각 뿔, 팔각 프리즘 및 반구에 대응되도록 각각 제1 기재를 패터닝하였다. 패터닝된 제1 기재 상에 그래핀을 전사한 다음, 산소 플라즈마( $\text{O}_2$  plasma, 40sccm, 100W, 5s)에 의한 반응성 이온 식각(RIE) 및 포토리소그래피를 진행하여 깎지 패턴(interdigitated pattern)의 제1 전극 및 제2 전극을 형성하였다.
- [0243] 깎지 패턴의 제1 및 제2 전극 상에 이황화 몰리브덴( $\text{MoS}_2$ )을 전사하고, 플루오로포름/산소 플라즈마( $\text{CHF}_3/\text{O}_2$  plasma(35/10 sccm, 100W, 5s)에 의한 반응성 이온 식각(RIE) 및 포토리소그래피를 진행하여 2차원 전이금속 칼코겐 화합물 채널을 형성하였다. 이 후, 2차원 전이금속 칼코겐 화합물 채널, 제1 전극 및 제2 전극이 형성된 제1 기재 상에 또 다른 SU-8를 스핀 코팅하여 5 $\mu\text{m}$ 의 제2 기재를 형성한 다음, 제1 절곡부 및 제2 절곡부를 형성하기 위해 오프닝부를 패터닝하여 2차원 광검출 구조체를 제조하고, 포토레지스트(PR)를 스핀 코팅 및 패터닝하여 본딩부를 제외한 영역에 포토레지스트를 잔존시켜 결합 영역(본딩부) 및 비 결합 영역(베이스부, 제1 절곡부, 제2 절곡부 및 가지부)을 형성하였다.
- [0244] 이후, 불산(HF) 처리 및 PDMS 슬래브를 이용하여 2차원 광검출 구조체를 PVA 테이프로 전사하였다.
- [0245] 연신 기관(Dragon Skin, Smooth-On)을 FEA 시뮬레이션에 의해 최적화된 변형률까지 이축 방향을 예비 연신시키고, 이축 연신된 연신 기관과 PVA 테이프에 부착된 2차원 광검출 구조체를 각각 UV/ $\text{O}_3$ 에 노출시킨 다음, 이축 연신된 연신 기관과 2차원 광검출 구조체를 적층하여 오븐에서 70℃의 온도로 5분 동안 베이킹(baking)한 후, PVA 테이프를 탈이온수(DI)로 용해시켰다.
- [0246] 마지막으로, 포토레지스트(PR)를 아세톤에 용해시켜 이축 연신된 연신 기관으로부터 비결합부의 결합을 약화시킨 다음, 이축 연신된 연신 기관의 연신 상태를 해제하여 3차원 구조의 광검출 소자를 제조하였다.

- [0248] 도 5a는 본 발명의 실시예에 따른 3차원 구조의 광검출 소자의 팔각 뿔(Octagonal prismoid) 및 팔각 프리즘(Octagonal prism) 형상에 따른 형상 파라미터(shape parameters) 및 키 디자인 파라미터(Key design

parameters)를 도시한 이미지이다.

- [0249] 도 5a를 참조하면, 팔각 뿔의 본 발명의 실시예에 따른 3차원 구조의 광검출 소자는 28%의 사전-변형률(pre-strain) 값을 갖고, 팔각 프리즘 형상의 본 발명의 실시예에 따른 3차원 구조의 광검출 소자는 111%의 사전-변형률 값을 가지며, 반구의 본 발명의 실시예에 따른 3차원 구조의 광검출 소자는 46%의 사전-변형률 값을 갖는 것을 알 수 있다.
- [0250] 도 5b는 본 발명의 실시예에 따른 3차원 구조의 광검출 소자의 사전-변형률 값에 대한 제1 절곡부 및 제2 절곡부의 너비 비(width ratio,  $W_1/W_0$ ) 파라미터를 도시한 그래프이다.
- [0251] 도 5b를 참조하면, 사전-변형률의 정도가 증가함에 따라 제1 절곡부 및 제2 절곡부의 너비 비(width ratio,  $W_1/W_0$ )가 감소하는 것을 알 수 있다.
- [0252] 도 5c는 팔각 뿔 및 팔각 프리즘 형상의 본 발명의 실시예에 따른 3차원 구조의 광검출 소자의 높이(h)에 따른 해제된 사전-변형률(released pre-strain)을 도출하기 위한 FEA 및 분석 예측 결과를 도시한 그래프이다.
- [0253] 도 5c에서 높이(h)는 베이스부 및 연신 기관 사이의 갭(gap, 두께 방향의 갭)을 의미한다.
- [0254] 도 5c를 참조하면, 사전-변형률의 해제 정도가 증가함에 따라 높이(h)가 증가하는 것을 알 수 있다.
- [0255] 도 5d는 팔각 뿔 및 팔각 프리즘 형상의 본 발명의 실시예에 따른 3차원 구조의 광검출 소자의 각도( $\Psi$ )에 따른 해제된 사전-변형률을 도출하기 위한 FEA 및 분석 예측 결과를 도시한 그래프이다.
- [0256] 도 5d에서 각도( $\Psi$ )는 연신 기관과 가지부 사이의 각도를 의미한다.
- [0257] 도 5d를 참조하면, 사전-변형률의 해제 정도가 증가함에 따라 각도( $\Psi$ )가 증가하는 것을 알 수 있다.
- [0258] 도 5a 내지 도 5e를 참조하면, 3차원 구조의 광검출 소자를 형성하기 위한 사전-변형률 값은 2차원 광검출 구조체의 다양한 기하학적 파라미터에 의해 조절되는 것을 알 수 있다.
- [0260] 도 6a는 본 발명의 실시예에 따른 3차원 구조의 광검출 소자를 해제된 사전-변형률의 함수로서 높이를 고려한 FEA 및 분석적 예측 결과를 도시한 그래프이고, 도 6b는 본 발명의 실시예에 따른 3차원 구조의 광검출 소자의 중간 단계의 기계적 조립 및 최종 기계적 조립(mechanical assembly) 상태를 도시한 이미지이다.
- [0261] 도 6a 및 도 6b를 참조하면, 사전-변형률의 해제 정도가 증가함에 따라 중심각이 점차 증가하여 최종 상태에서는 180°에 이르는 것을 알 수 있다. 또한, 사전-변형률의 해제 정도가 증가함에 따라 연신 기관과 베이스부 사이의 높이(h)도 증가하는 것을 알 수 있다.
- [0263] 도 7a는 팔각 프리즘 형상의 본 발명의 실시예에 따른 3차원 구조의 광검출 소자를 바닥에서 바라보았을 때(bottom view)의 최대 주 변형률(maximum principal strain)을 도시한 이미지이고, 도 7b는 팔각 뿔의 본 발명의 실시예에 따른 3차원 구조의 광검출 소자를 바닥에서 바라보았을 때의 최대 주 변형률을 도시한 이미지이며, 도 7c는 반구의 본 발명의 실시예에 따른 3차원 구조의 광검출 소자를 바닥에서 바라보았을 때의 최대 주 변형률을 도시한 이미지이다.
- [0264] 도 7a 내지 도 7c를 참조하면, 본 발명의 실시예에 따른 3차원 구조의 광검출 소자의 최대 주 변형률의 피크(peak value) 값은 제2 절곡부에서 나타나는 것을 알 수 있다.
- [0265] 또한, 본 발명의 실시예에 따른 3차원 구조의 광검출 소자는 제2 절곡부에서 변형률(strain)의 피크 값에 도달하고, 베이스부, 제1 절곡부, 가지부 및 본딩부의 변형률을 매우 낮은 것을 알 수 있다.
- [0266] 또한, 제2 절곡부의 두께/길이 비는 베이스부, 제1 절곡부, 가지부 및 본딩부보다 낮은 것을 알 수 있다.
- [0268] 도 8은 본 발명의 실시예에 따른 3차원 구조의 광검출 소자의 인터커넥션(interconnect)의 변형률 프로파일을 도시한 그래프이다.
- [0269] 본 발명의 실시예에 따른 3차원 구조의 광검출 소자는 제1 기재 및 제2 기재 사이에 그래핀 바이 레이어(bi-

layer)가 포함된 샌드위치 구조를 갖는 인터커넥션(interconnect)을 포함할 수 있다.

- [0270] 인터커넥션에 위치하는 ① 및 ②의 최대 변형률은 그래핀의 고유 탄성 한계(6%)보다 훨씬 낮은 것을 알 수 있다.
- [0272] 도 9a는 본 발명의 실시예에 따른 3차원 구조의 광검출 소자의 문턱 값(threshold value)에 따른 인터커넥션의 면적 비율(areal proportion)을 도시한 그래프이고, 도 9b는 0.25%의 문턱 값을 갖는 본 발명의 실시예에 따른 3차원 구조의 광검출 소자를 도시한 이미지이며, 도 9c는 0.83%의 문턱 값을 갖는 본 발명의 실시예에 따른 3차원 구조의 광검출 소자를 도시한 이미지이고, 도 9d는 1.5%의 문턱 값을 갖는 본 발명의 실시예에 따른 3차원 구조의 광검출 소자를 도시한 이미지이다.
- [0273] 도 9a 내지 도 9d를 참조하면, 유의미한 변형률(significant strain, >2%)을 갖는 영역의 인터커넥션의 면적 비율은 0.2% 미만인 것을 알 수 있다.
- [0275] 도 10은 플랫(flat) 그래핀/제1 및 제2 기재로 구성된 인터커넥션을 포함하는 본 발명의 실시예에 따른 3차원 구조의 광검출 소자 및 버클드(buckled) 그래핀/제1 및 제2 기재로 구성된 인터커넥션을 포함하는 본 발명의 실시예에 따른 3차원 구조의 광검출 소자의 전류-전압(I-V) 특성을 도시한 그래프이다.
- [0276] 도 10을 참조하면, 최소 밴딩 반경(변형률이 2.17%로 최대화되는 부분) 영역에서의 그래핀의 저항은  $\sim 20.7k\Omega$ 이고, 플랫 그래핀/제1 및 제2 기재로 구성된 인터커넥션을 포함하는 본 발명의 실시예에 따른 3차원 구조의 광검출 소자에서는  $\sim 18.3k\Omega$ 이다.
- [0278] 도 11은  $-20mV$  내지  $2mV$ 의 저전압 범위에서의 본 발명의 실시예에 따른 3차원 구조의 광검출 소자에 포함되는 광저항기의 전류-전압(I-V) 특성을 도시한 그래프이다.
- [0279] 도 11을 참조하면, 선형 거동과 대칭적인 전류-전압(I-V) 특성은 그래핀 및 이황화 몰리브덴( $MoS_2$ ) 사이의 옴릭 콘택(ohmic contact)과 대응되는 것을 알 수 있다.
- [0281] 도 12는 서로 다른 레이저 전력 밀도에 특정된 본 발명의 실시예에 따른 3차원 구조의 광검출 소자에 포함되는 광저항기의 암전(dark) 및 조명(illuminated) 상태의 전류비를 도시한 그래프이다.
- [0282] 도 12를 참조하면, 암전 및 조명 상태에서의 광전류( $I_{ph}$ , photocurrent)의 최대비는  $10^3 W/m^2$ 의 강도에서  $\sim 427$ 에 도달하는 것을 알 수 있다.
- [0284] 도 13은 실리콘 산화물( $SiO_2$ ) 상에 형성되는 본 발명의 실시예에 따른 3차원 구조의 광검출 소자에 포함되는 광저항기 및 SU-8 상에 형성되는 본 발명의 실시예에 따른 3차원 구조의 광검출 소자에 포함되는 광저항기의 시간-해상도 광반응성(time-resolved photoresponse) 결과를 도시한 그래프이다.
- [0285] 도 13을 참조하면,  $MoS_2/SiO_2$  계면보다  $MoS_2/SU-8$ 의 계면에서의 표면 트랩 수가 더 많이 존재하기 때문에 SU-8 상에 형성되는 본 발명의 실시예에 따른 3차원 구조의 광검출 소자에 포함되는 광저항기의 시간-해상도 광반응성은 실리콘 산화물( $SiO_2$ ) 상에 형성되는 본 발명의 실시예에 따른 3차원 구조의 광검출 소자에 포함되는 광저항기보다 낮은 것을 알 수 있다.
- [0287] 도 14a는 제1 보호층 및 제2 보호층을 포함하는 본 발명의 실시예에 따른 3차원 구조의 광검출 소자에 포함되는 광저항기의 투과전자현미경(transmission electron microscope, TEM) 측정 이미지를 도시한 것이다.
- [0288] 도 14a를 참조하면, 제1 보호층( $Al_2O_3$ ), 2차원 전이금속 칼코겐 화합물 채널( $MoS_2$ ) 및 제2 보호층( $Al_2O_3$ )이 샌드위치 구조로 형성된 것을 알 수 있다.

[0289] 도 14b는 제1 보호층 및 제2 보호층을 포함하지 않는 본 발명의 실시예에 따른 3차원 구조의 광검출 소자에 포함되는 광저항기(SU-8/MoS<sub>2</sub>/Air), 제1 보호층을 포함하는 본 발명의 실시예에 따른 3차원 구조의 광검출 소자에 포함되는 광저항기(SU-8/MoS<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) 및 제1 보호층 및 제2 보호층을 포함하는 본 발명의 실시예에 따른 3차원 구조의 광검출 소자에 포함되는 광저항기(SU-8/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/MoS<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)의 광 반응성 결과를 도시한 그래프이다.

[0290] 도 14c는 제1 보호층 및 제2 보호층을 포함하는 광저항기를 포함하는 본 발명의 실시예에 따른 3차원 구조의 광검출 소자의 광학 사진을 도시한 것이고, 도 14d는 제1 보호층 및 제2 보호층을 포함하는 광저항기를 포함하는 본 발명의 실시예에 따른 3차원 구조의 광검출 소자의 광이미지(photoimaging)를 도시한 것이다.

[0291] 도 14a 내지 도14d를 참조하면, 제1 보호층(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) 및 제2 보호층(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)은 2차원 전이금속 칼코겐 화합물 채널(MoS<sub>2</sub>)의 표면 거칠기를 감소시키고, 깨끗하며 컨포멀한 접촉을 제공하여 2차원 전이금속 칼코겐 화합물 채널(MoS<sub>2</sub>) 계면의 트랩을 감소시킨다.

[0292] 또한, 제1 보호층(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) 및 제2 보호층(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)로 하이-k 유전체 물질을 사용하여 2차원 전이금속 칼코겐 화합물 채널(MoS<sub>2</sub>)과 제1 보호층(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) 및 제2 보호층(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) 간의 큰 유전체 불일치는 제공함으로써, 2차원 전이금속 칼코겐 화합물 채널(MoS<sub>2</sub>) 계면에서의 쿨롱성 불순물을 억제하고 전송 중인 캐리어 트랩을 감소시킨다.

[0293] 따라서, 제1 보호층 및 제2 보호층을 포함하는 광저항기를 포함하는 본 발명의 실시예에 따른 3차원 구조의 광검출 소자는 광에 따른 캐리어 전송이 빨라져 응답 속도가 향상될 수 있다.

[0294] 하기 [표 1]은 제1 보호층 및 제2 보호층을 포함하는 본 발명의 실시예에 따른 3차원 구조의 광검출 소자에 포함되는 광저항기의 응답속도 결과를 도시한 표이다.

[0295] [표 1]

	$\tau_{rise}$ (ms)	$\tau_{decay}$ (ms)
SU-8/MoS <sub>2</sub> /Air	176.7±95.4	264.9±120.7
SU-8/MoS <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	29.52±17.4	51.66±22.7
SU-8/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /MoS <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7.3±4.2	14.7±7.5

[0296]

[0297] [표 1]을 참조하면, 제1 보호층 및 제2 보호층을 포함하는 본 발명의 실시예에 따른 3차원 구조의 광검출 소자에 포함되는 광저항기(SU-8/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/MoS<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)의 상승 시간( $\tau_{rise}$ ) 및 감쇠 시간( $\tau_{decay}$ )은 제1 보호층 및 제2 보호층을 포함하지 않는 본 발명의 실시예에 따른 3차원 구조의 광검출 소자에 포함되는 광저항기(SU-8/MoS<sub>2</sub>/Air)보다 20배 증가하는 것을 알 수 있다.

[0298] 따라서, 제1 보호층 및 제2 보호층에 의해 본 발명의 실시예에 따른 3차원 구조의 광검출 소자에 포함되는 광저항기의 응답 속도가 향상되는 것을 알 수 있다.

[0300] 도 15는 본 발명의 실시예에 따른 3차원 구조의 광검출 소자의 안정성 테스트 결과를 도시한 그래프이다.

[0301] 도 15를 참조하면, 암전류(dark current) 및 광 반응성(photoresponse)은 3개월 이상 변하지 않고 우수한 환경 안정성을 나타내고, 안정적인 동작은 2차원 물질에 의존하는 것을 알 수 있다.

[0303] 도 16a는 본 발명의 실시예에 따른 3차원 구조의 광검출 소자의 주사전자현미경(SEM) 측정 이미지이고, 도 16b는 본 발명의 실시예에 따른 3차원 구조의 광검출 소자의 5X5 어레이의 주사전자현미경(SEM) 측정 이미지이다.

[0304] 도 16a를 참조하면, 본 발명의 실시예에 따른 3차원 구조의 광검출 소자는 10,000의 개별 광저항기를 포함하고, 보다 구체적으로 16개의 가지부에 각각 ~6,000개의 광저항기를 포함하는 것을 알 수 있다.

- [0305] 도 16b를 참조하면, 본 발명의 실시예에 따른 3차원 구조의 광검출 소자는 연신 기관 상에 3차원 구조의 광검출 소자가 적어도 하나 이상 포함되는 어레이 구조를 갖는 것을 알 수 있다.
- [0307] 도 17은 비파괴적인 변형물에 따른 본 발명의 실시예에 따른 3차원 구조의 광검출 소자의 주사전자현미경(SEM) 측정 이미지이다.
- [0308] 도 17을 참조하면, 본 발명의 실시예에 따른 3차원 구조의 광검출 소자는 기계적인 유연성을 갖기 때문에, 밴딩 동작, 스트레칭 동작 및 트위스트 동작 시에 높은 안정성을 나타내는 것을 알 수 있다.
- [0310] 도 18a 내지 도 18d는 상이한 평면 내 2축 연신 상태(different in-plane biaxial stretching states)에 따른 본 발명의 실시예에 따른 3차원 구조의 광검출 소자의 주사전자현미경(SEM) 측정 이미지이다.
- [0311] 도 18a 내지 도 18d를 참조하면, 본 발명의 실시예에 따른 3차원 구조의 광검출 소자의 5X5 어레이는 높이를 통해 가로 방향으로 균일하게 스트레치(stretch)되는 것을 알 수 있고, 스트레치(stretch) 전후(도 18a 및 도 18d)에 동일한 높이를 갖는 것으로 보아, 스트레치(stretch) 후에 본래의 치수로 안정적으로 복원되는 것을 알 수 있다.
- [0312] 또한, 도 18a 내지 도 18d를 참조하면, 본 발명의 실시예에 따른 3차원 구조의 광검출 소자는 반복 스트레치(stretch) 중에 균열 및 박리 현상이 발생하지 않는 것으로 보아, 우수한 기계적 견고성을 나타내는 것을 알 수 있다.
- [0314] 도 19는 본 발명의 실시예에 따른 3차원 구조의 광검출 소자의 파장(Wavelength)에 따른 투과율(Transmittance)을 도시한 스펙트럼이다.
- [0315] 도 19를 참조하면, 본 발명의 실시예에 따른 3차원 구조의 광검출 소자에 포함되는 광저항기는 이중층의 그래핀, 단층의 이황화 몰리브덴 및 5 $\mu\text{m}$  내지 7 $\mu\text{m}$ 의 SU-8을 포함함으로써, 550nm에서 높은 광투과율(~87%)을 나타내는 것을 알 수 있다.
- [0317] 도 20a는 입사 레이저 빔의 위치와 방향을 식별하는 본 발명의 실시예에 따른 3차원 구조의 광검출 소자를 도시한 광학 사진이고, 도 20b는 입사 레이저 빔의 위치와 방향을 식별하는 본 발명의 실시예에 따른 3차원 구조의 광검출 소자의 사진 이미지, 광반응성(photoresponse) 및 세기 분포(intensity distribution)를 도시한 것이며, 도 20c는 광의 산란을 증가시키기 위한 의도적인 조건(intentional condition)을 도식화한 것이다.
- [0318] 도 20a 내지 도 20c에서 산란은 레이저 빔이 본 발명의 실시예에 따른 3차원 구조의 광검출 소자에 입사되고 출사되는 위치 근처의 광저항기에 큰 영향을 준다.
- [0319] 도 20a 내지 도 20c에서 조명 포인트에 가장 가까운 9개의 광저항기만이 광신호에 응답하기 때문에, 입사광의 위치는 9개의 광저항기의 좌표(반구의 중심 대해)로부터 계산(식 1)될 수 있다.
- [0320] [식 1]
- $$P_I(\theta_I, \varphi_I) = (\sum_1^9(\theta_n * \frac{I_{ph,n}}{\sum I_n}), \sum_1^9(\varphi_n * \frac{I_{ph,n}}{\sum I_n}))$$
- [0321]
- [0322]  $P_I$ 는 입사 포인트(incident point)의 구 좌표(spherical coordinate)이고,  $I_{ph}$ 는  $n^{\text{th}}$  광저항기의 광전류(photoelectric current)이,  $\phi$ 는 편각(polar angle)이고,  $\theta$ 는 방위각(azimuthal angle)이다.
- [0323] 또한, 본 발명의 실시예에 따른 3차원 구조의 광검출 소자는 레이저 빔이 이동함에 따라, 그 궤도가 초기 지점으로부터 계산되어 기록될 수 있다.
- [0324] 도 20a 내지 도 20c를 참조하면, 레이저 빔의 위치와 방향을 확인하는 것으로 간주되는 9개의 광저항기 중  $P_1$ 의 d5와  $P_2$ 의 d29만이 입사광에 반응하고, 나머지 광저항기는 산란된 광에 의해서만 반응한다.



- [0325] 또한, 입사 광은 3차원 구조의 광검출 소자를 통과할 때 광의 강도가 손실되기 때문에 P2에서의 광반응성은 P1에서의 광반응성에 비해 감소된다.
- [0326] 따라서, 3차원 구조의 광검출 소자의 투과도가 매우 중요한 요소이나, 본 발명의 실시예에 따른 3차원 구조의 광검출 소자는 높은 투과도를 갖기 때문에 광반응성의 감소율이 비교적 적다.
- [0328] 도 21a 및 도 21b는 다양한 입사각으로 레이저 빔이 입사되는 본 발명의 실시예에 따른 3차원 구조의 광검출 소자를 도시한 이미지이다.
- [0329] 도 21a를 참조하면, 레이저 빔이  $-45^\circ$ ,  $90^\circ$  및  $45^\circ$ 의 입사각으로 본 발명의 실시예에 따른 3차원 구조의 광검출 소자에 입사되고, 도 21b를 참조하면, 레이저 빔이  $90^\circ$ ,  $67.5^\circ$  및  $0^\circ$ 의 입사각으로 본 발명의 실시예에 따른 3차원 구조의 광검출 소자에 입사된다.
- [0331] 도 22는 본 발명의 실시예에 따른 3차원 구조의 광검출 소자의 광전류 맵을 도시한 그래프이다.
- [0332] 도 22를 참조하면, 본 발명의 실시예에 따른 3차원 구조의 광검출 소자에서 측정된 값으로부터 계산된 좌표가 도 21a 및 도 21b의 각도기로 측정된 좌표와 일치하는 것을 알 수 있다.
- [0333] 측정된 값은 x-y 평면 및 z 방향 사이의 편각(polar angle,  $\phi$ ) 및 방위각(azimuthal angle,  $\theta$ )일 수 있다.
- [0335] 도 23a는  $0^\circ$ 에서  $25^\circ$ 의 편각(polar angle,  $\phi$ )이 검출 가능한 본 발명의 실시예에 따른 3차원 구조의 광검출 소자를 도시한 개략도이고, 도 23b는  $45^\circ$ 의 최대 감지 방위각(azimuthal angle,  $\theta$ )을 갖는 본 발명의 실시예에 따른 3차원 구조의 광검출 소자를 도시한 개략도이다.
- [0336] 도 23a를 참조하면, 본 발명의 실시예에 따른 3차원 구조의 광검출 소자가 방위각을  $360^\circ$ 로 맵핑할 수 있다고 하더라도 편각( $\phi$ )은 광저항기의 배열에 제한되는 것을 알 수 있다.
- [0337] 그러나, 도 23b를 참조하면, 본 발명의 실시예에 따른 3차원 구조의 광검출 소자에 포함되는 광저항기의 수를 증가시켜 배열을 조정함으로써 편각( $\phi$ )을 최대  $45^\circ$ 까지 측정할 수 있는 것을 알 수 있다.
- [0339] 도 24는 본 발명의 실시예에 따른 3차원 구조의 광검출 소자에 포함되는 광저항기 사이의 거리의 관계를 도시한 이미지이다.
- [0340] 도 24는 저밀도 어레이(Low density) 및 고밀도 어레이(High density)를 비교 측정하였고, 고밀도 어레이는 광저항기 사이의 거리가 저밀도 어레이의 광저항기 사이의 거리의 절반이다.
- [0341] [표 2]는 측정된 레이저 빔 위치와 실제 위치 사이의 편차를 도시한 표이다.
- [0342] [표 2]

Reference angle	$\theta = -45.0^\circ$ $\phi = 90.0^\circ$	$\theta = 0.0^\circ$ $\phi = 90.0^\circ$	$\theta = 45.0^\circ$ $\phi = 90.0^\circ$	$\theta = 0.0^\circ$ $\phi = 90.0^\circ$	$\theta = 0.0^\circ$ $\phi = 78.7^\circ$	$\theta = 0.0^\circ$ $\phi = 67.5^\circ$	$\theta = 45.0^\circ$ $\phi = 67.5^\circ$	$\theta = 90.0^\circ$ $\phi = 90.0^\circ$	$\theta = 135^\circ$ $\phi = 112.5^\circ$	Average deviation
Low density	$\Delta\theta = 0.0^\circ$ $\Delta\phi = 0.3^\circ$	$\Delta\theta = 1.1^\circ$ $\Delta\phi = 1.1^\circ$	$\Delta\theta = 0.7^\circ$ $\Delta\phi = 1.3^\circ$	$\Delta\theta = 0.7^\circ$ $\Delta\phi = 0.5^\circ$	$\Delta\theta = 0.1^\circ$ $\Delta\phi = 1.4^\circ$	$\Delta\theta = 0.4^\circ$ $\Delta\phi = 1.3^\circ$	$\Delta\theta = 0.3^\circ$ $\Delta\phi = 1.7^\circ$	$\Delta\theta = 0.5^\circ$ $\Delta\phi = 0.4^\circ$	$\Delta\theta = 0.5^\circ$ $\Delta\phi = 1.4^\circ$	$\Delta\theta = 0.5^\circ$ $\Delta\phi = 1.0^\circ$
High density	$\Delta\theta = 0.1^\circ$ $\Delta\phi = 0.1^\circ$	$\Delta\theta = 0.1^\circ$ $\Delta\phi = 0.3^\circ$	$\Delta\theta = 0.1^\circ$ $\Delta\phi = 0.1^\circ$	$\Delta\theta = 0.2^\circ$ $\Delta\phi = 0.3^\circ$	$\Delta\theta = 0.1^\circ$ $\Delta\phi = 1.2^\circ$	$\Delta\theta = 0.1^\circ$ $\Delta\phi = 1.1^\circ$	$\Delta\theta = 0.1^\circ$ $\Delta\phi = 1.4^\circ$	$\Delta\theta = 0.1^\circ$ $\Delta\phi = 0.1^\circ$	$\Delta\theta = 0.1^\circ$ $\Delta\phi = 1.2^\circ$	$\Delta\theta = 0.1^\circ$ $\Delta\phi = 0.6^\circ$

- [0343]
- [0344] 도 24 및 [표 2]를 참조하면, 측정된 편차는 저밀도 어레이보다 고밀도 어레이에서 감소되고, 광저항기 사이의 거리가 감소함에 따라 레이저 빔의 위치 식별 정확성이 증가하는 것을 알 수 있다.
- [0346] 도 25는 레이저 빔 지름(beam diameter)에 따른 본 발명의 실시예에 따른 3차원 구조의 광검출 소자의 정확도를 측정된 결과를 도시한 이미지이다.

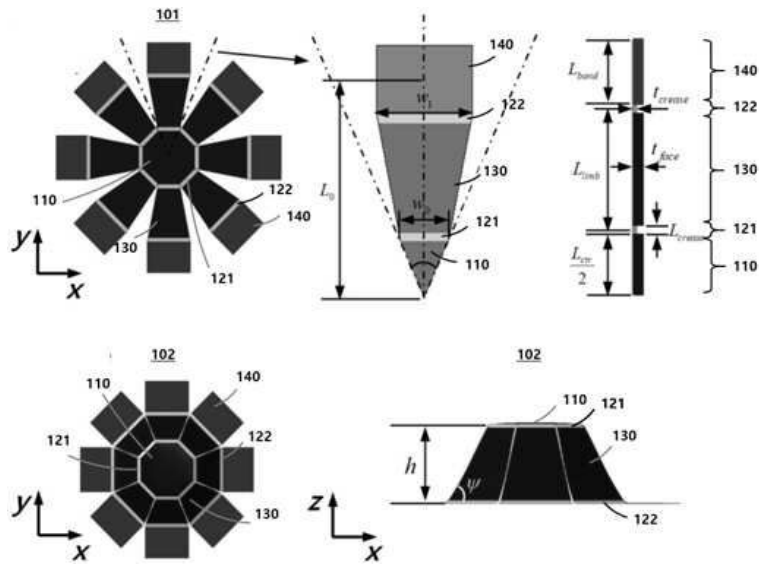
- [0347] 도 25는 레이저 및 본 발명의 실시예에 따른 3차원 구조의 광검출 소자의 위치를 변경하지 않고 레이저 빔의 입사 지점을 측정하였고, 측정된 입사 위치와 실제 입사 위치 사이의 편차를 계산하기 위해 레이저 빔 지름을 조절하여 측정하였다.
- [0348] 도 25를 참조하면, 본 발명의 실시예에 따른 3차원 구조의 광검출 소자에 조사되는 레이저 빔의 지름이 증가함에 따라 광반응성이 감소(막대 그래프 참조)하는 것으로 보아, 측정된 편차는 레이저 빔의 지름이 증가함에 따라 레이저 스폿(spot)의 크기가 증가함으로써 증가하는 것을 알 수 있다.
- [0350] 도 26은 고주파(High frequency)에 따른 본 발명의 실시예에 따른 3차원 구조의 광검출 소자의 정확도를 측정한 결과를 도시한 이미지이다.
- [0351] 도 26은 레이저 및 본 발명의 실시예에 따른 3차원 구조의 광검출 소자의 위치를 변경하지 않고 레이저 빔의 입사 지점을 측정하였고, 측정된 입사 위치와 실제 입사 위치 사이의 편차를 계산하기 위해 주파수를 조절하여 측정하였다.
- [0352] 도 26을 참조하면, 본 발명의 실시예에 따른 3차원 구조의 광검출 소자의 입사 영역(P1) 및 출사 영역(P2)에서의 입사 레이저 빔의 위치는 주파수가 증가함에 따라 광반응성(막대 그래프 참조)을 통해 측정되고, 측정된 편차는 주파수가 증가함에 따라 약간씩 증가하지만, 입사 영역(P1) 및 출사 영역(P2)에서의 입사 레이저 빔의 위치는 KHz 범위로 용이하게 식별되는 것을 알 수 있다.
- [0354] 도 27a는 화학적 기상 증착(CVD)법으로 성장된 단층 이황화 몰리브덴( $\text{MoS}_2$ )의 라만 스펙트럼(Raman spectrum)을 도시한 그래프이고, 도 27b는 이중층 그래핀의 라만 스펙트럼을 도시한 그래프이다.
- [0355] 도 27a 및 도 27b를 참조하면, 본 발명의 실시예에 따른 3차원 구조의 광검출 소자에 포함되는 광저항기의 2차원 전이금속 칼코겐 화합물 채널로 사용되는 이황화 몰리브덴( $\text{MoS}_2$ )이 단층으로 잘 형성된 것을 알 수 있고, 본 발명의 실시예에 따른 3차원 구조의 광검출 소자에 포함되는 광저항기의 전극으로 사용되는 그래핀이 이중층으로 형성된 것을 알 수 있다.
- [0357] 이상과 같이 본 발명은 비록 한정된 실시예와 도면에 의해 설명되었으나, 본 발명은 상기의 실시예에 한정되는 것은 아니며, 본 발명이 속하는 분야에서 통상의 지식을 가진 자라면 이러한 기재로부터 다양한 수정 및 변형물이 가능하다.
- [0358] 그러므로, 본 발명의 범위는 설명된 실시예에 국한되어 정해져서는 아니 되며, 후술하는 특허청구범위뿐만 아니라 이 특허청구범위와 균등한 것들에 의해 정해져야 한다.

## 부호의 설명

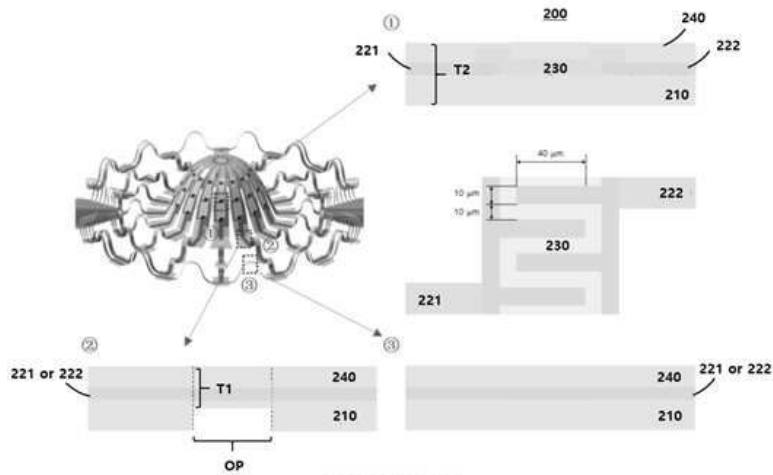
- [0360]
- |                          |                  |
|--------------------------|------------------|
| 110: 베이스부                | 121: 제1 절곡부      |
| 122: 제2 절곡부              | 130: 적어도 하나의 가지부 |
| 140: 본딩부                 | 210: 제1 기재       |
| 221: 제1 전극               | 222: 제2 전극       |
| 230: 2차원 전이금속 칼코겐 화합물 채널 | 240: 제2 기재       |

도면

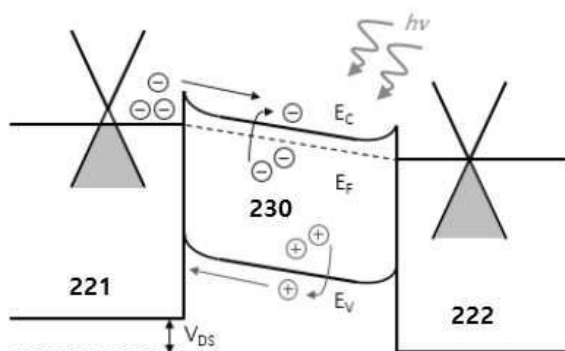
도면1



도면2a

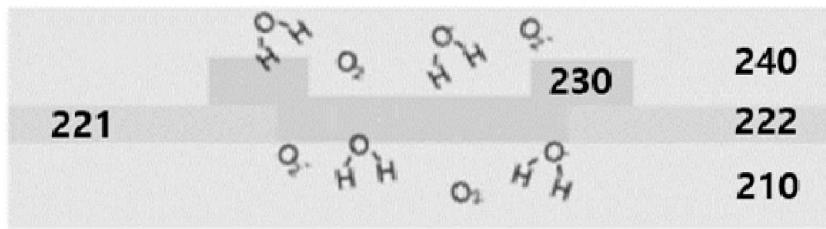


도면2b

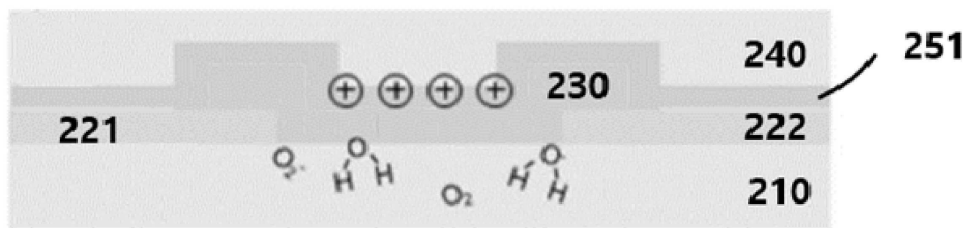




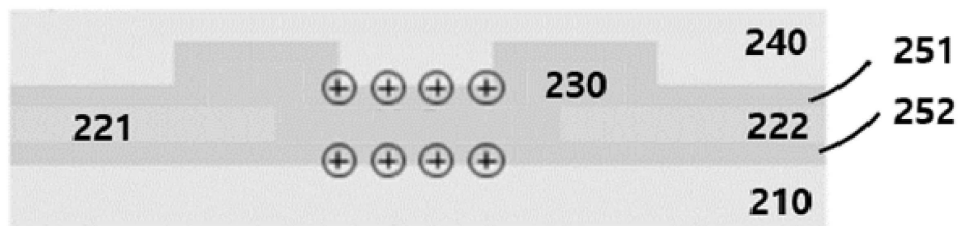
도면3a



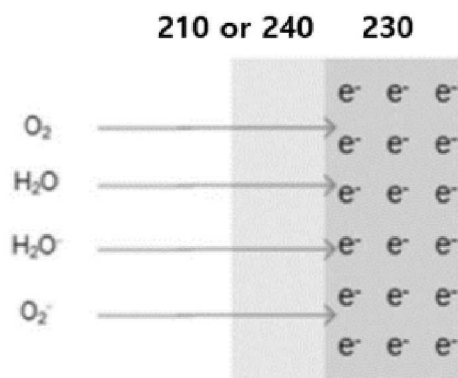
도면3b



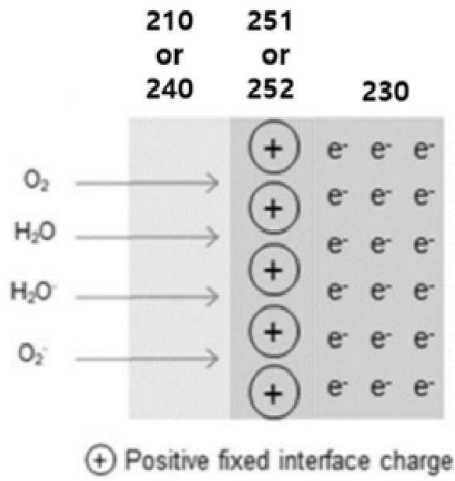
도면3c



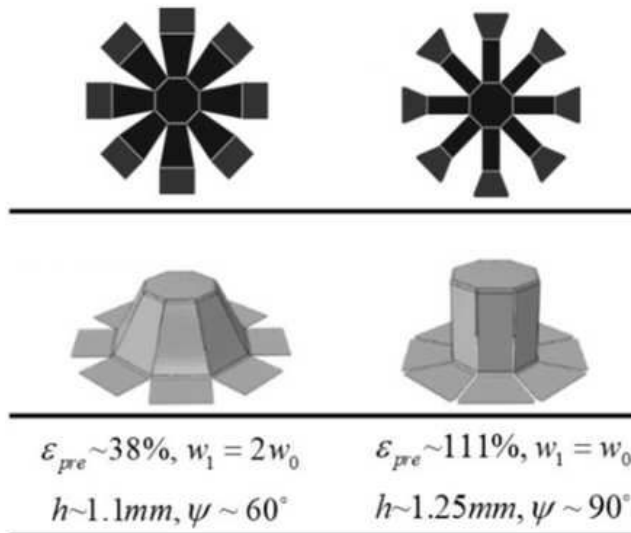
도면4a



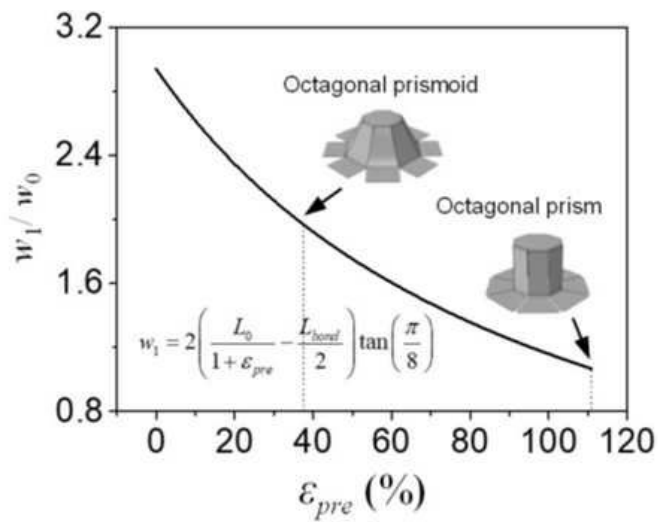
도면4b



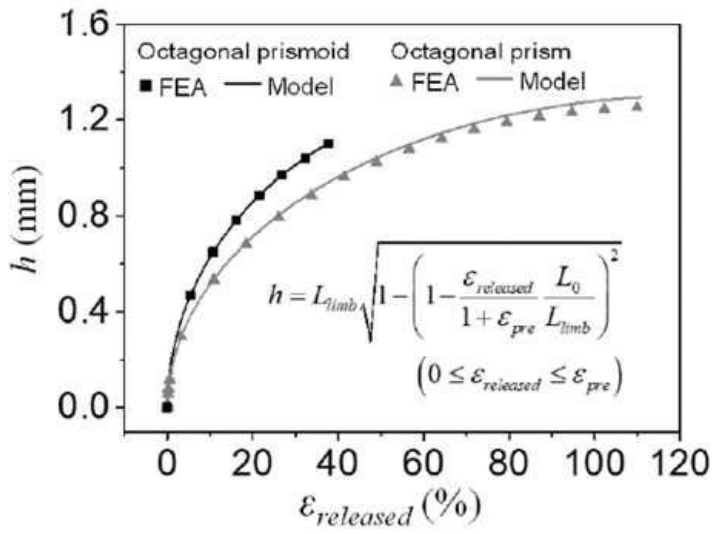
도면5a



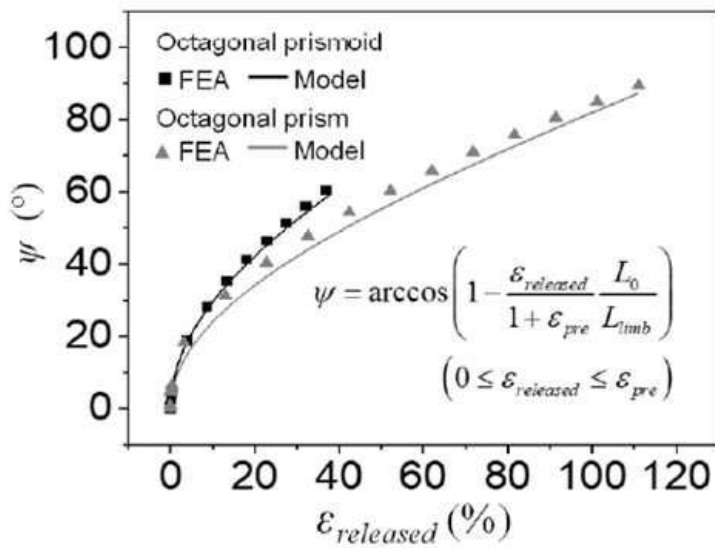
도면5b



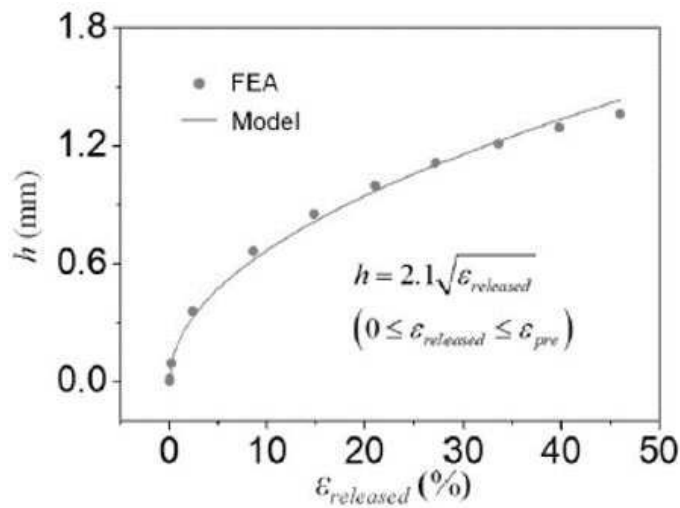
도면5c



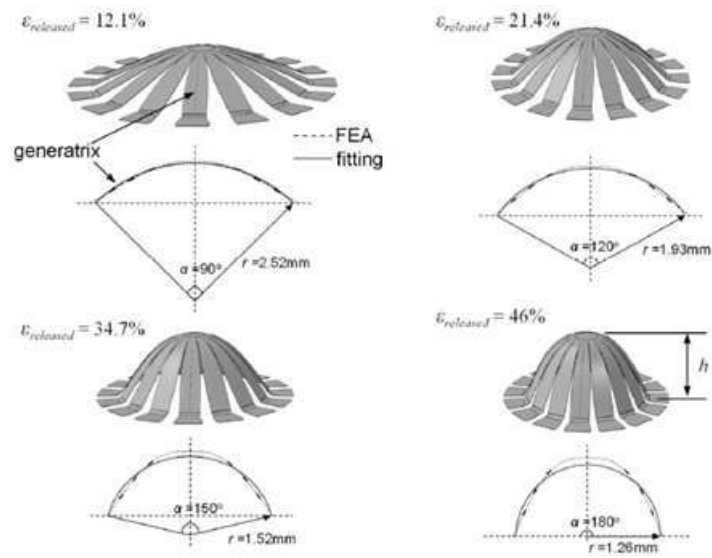
도면5d



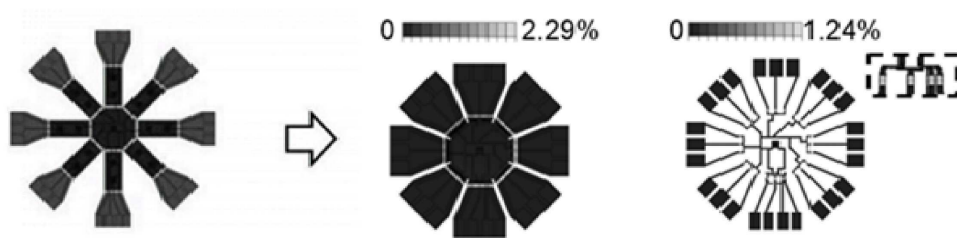
도면6a



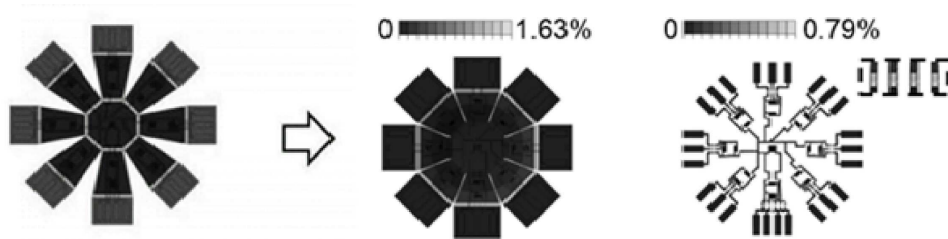
도면6b



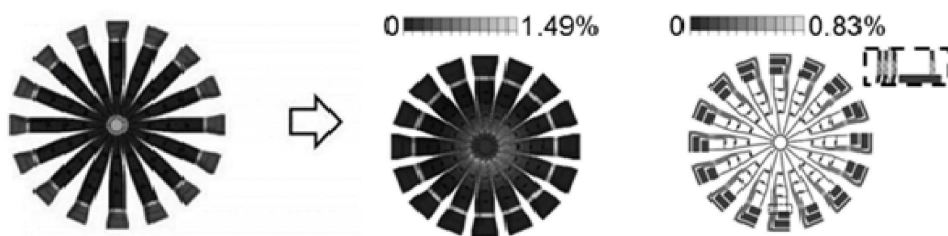
도면7a



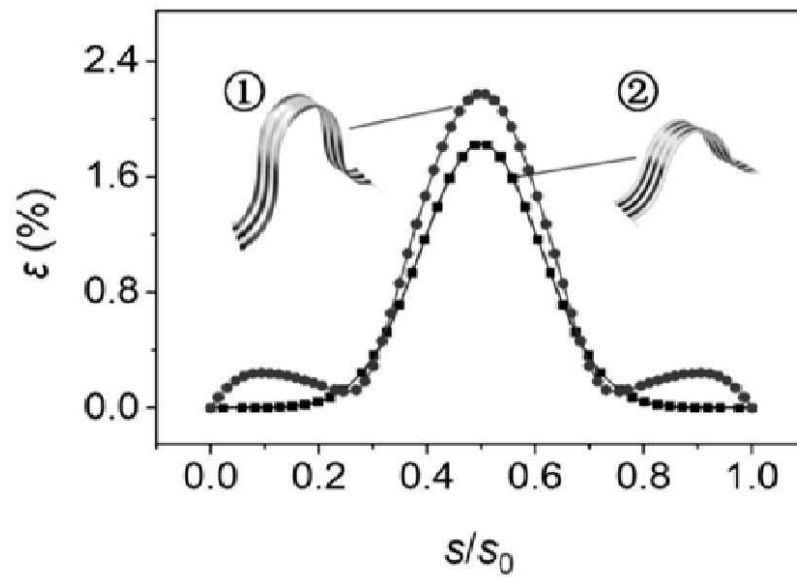
도면7b



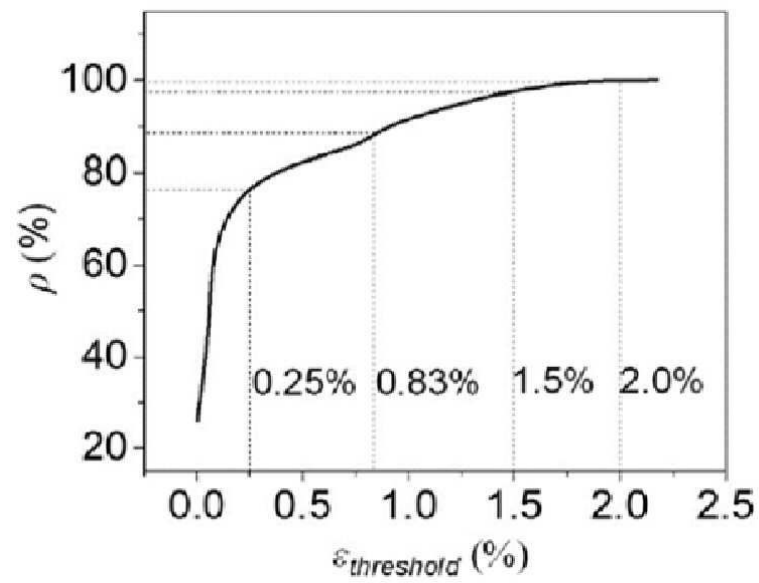
도면7c



도면8



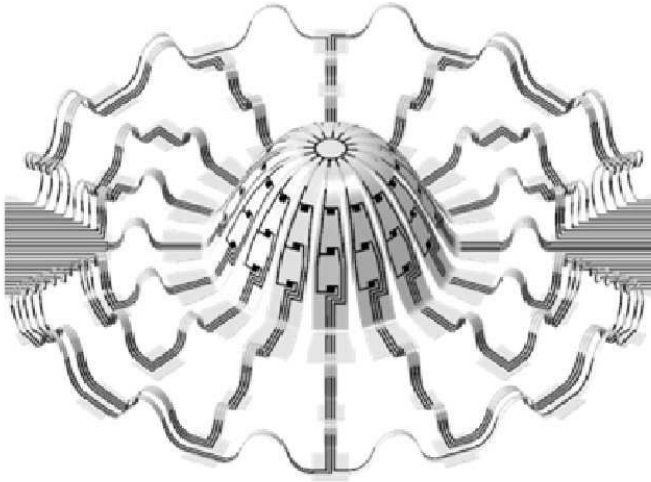
도면9a



도면9b

$\varepsilon \geq \varepsilon_{threshold}$   $\varepsilon < \varepsilon_{threshold}$

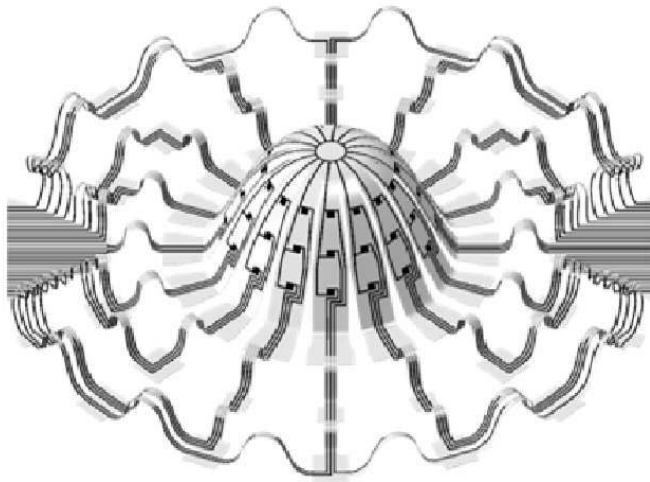
$\varepsilon_{threshold} = 0.25\%$



도면9c

$\varepsilon \geq \varepsilon_{threshold}$   $\varepsilon < \varepsilon_{threshold}$

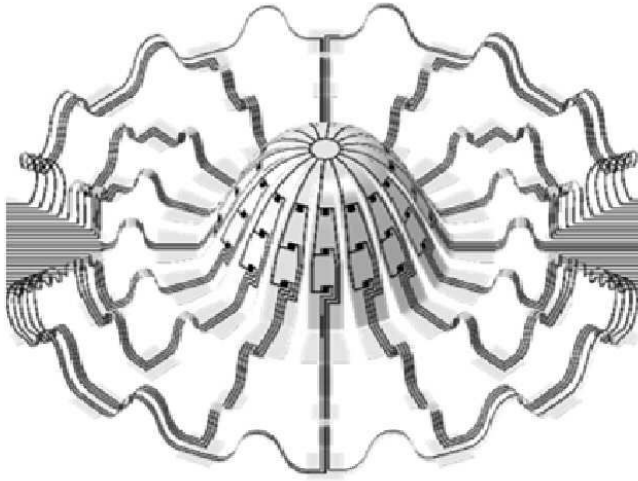
$\varepsilon_{threshold} = 0.83\%$



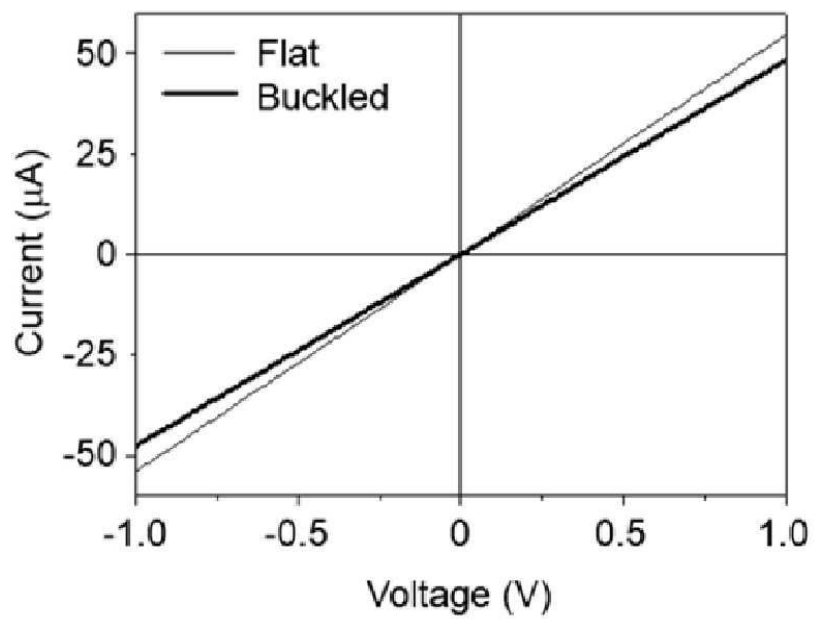


도면9d

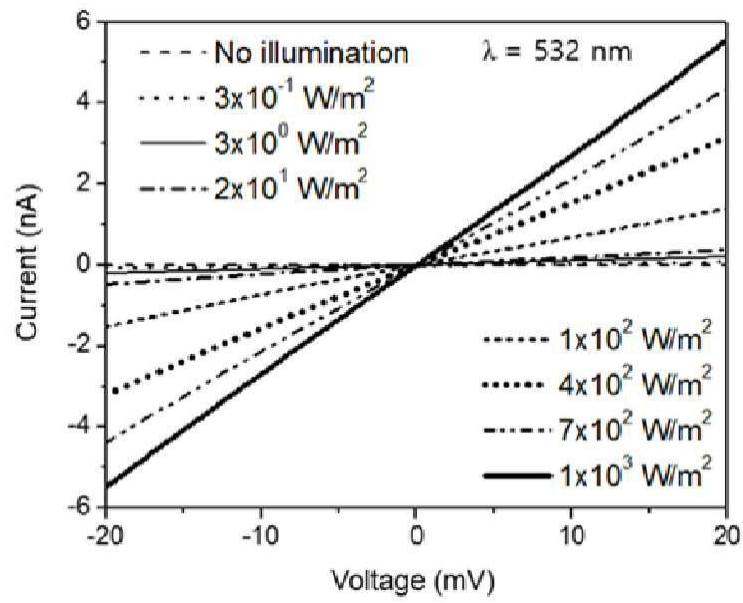
$\varepsilon \geq \varepsilon_{threshold}$        $\varepsilon < \varepsilon_{threshold}$   
 $\varepsilon_{threshold} = 1.5\%$



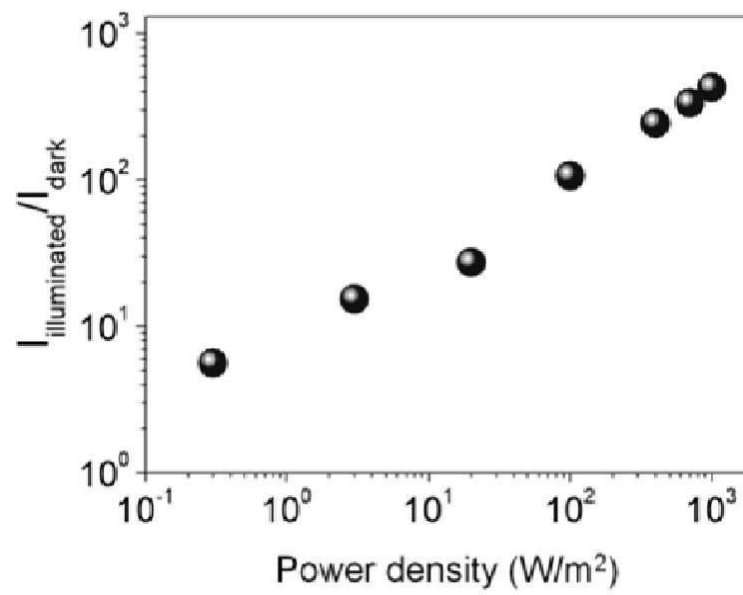
도면10



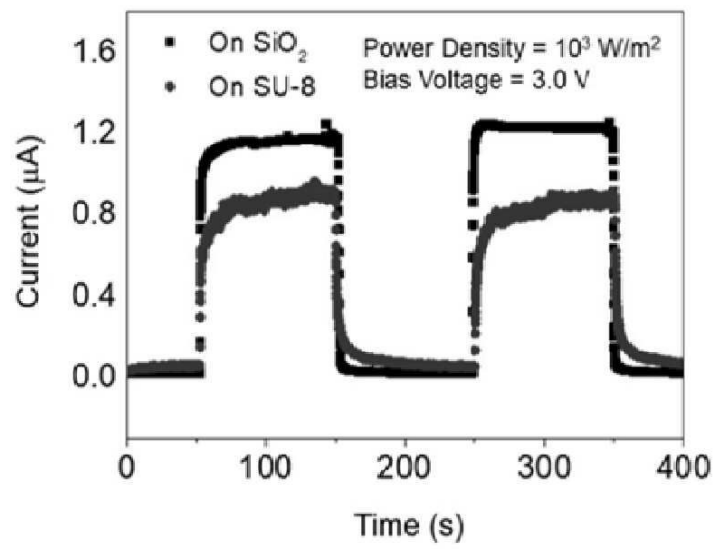
도면11



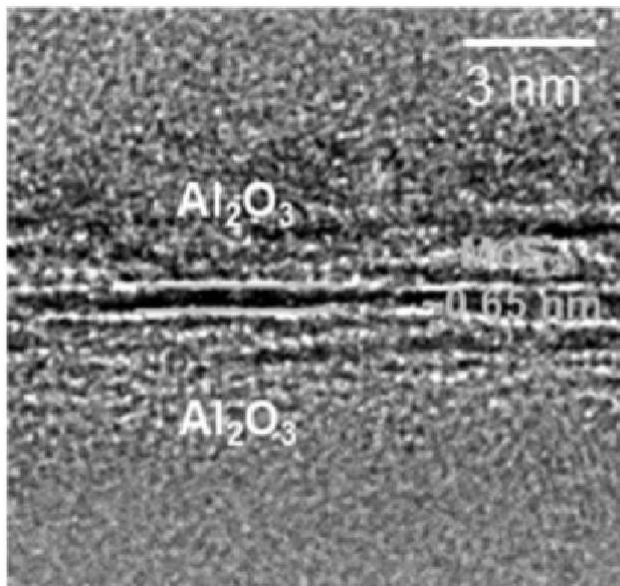
도면12



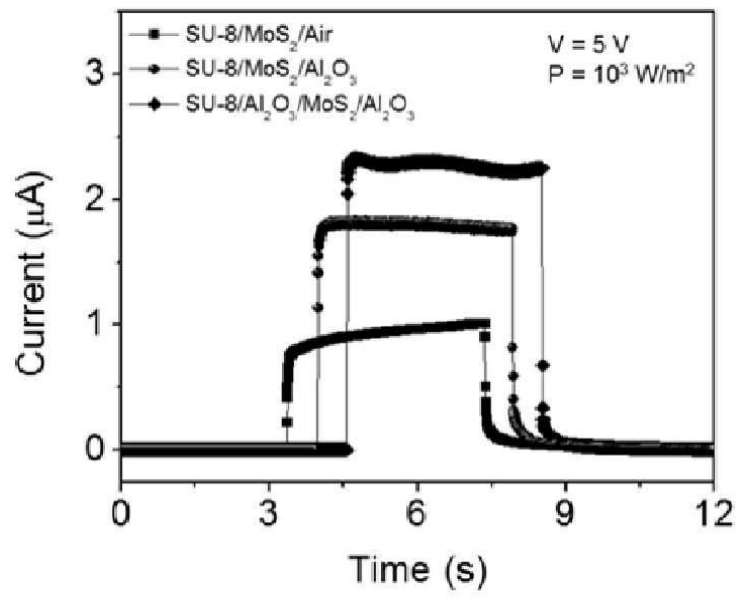
도면13



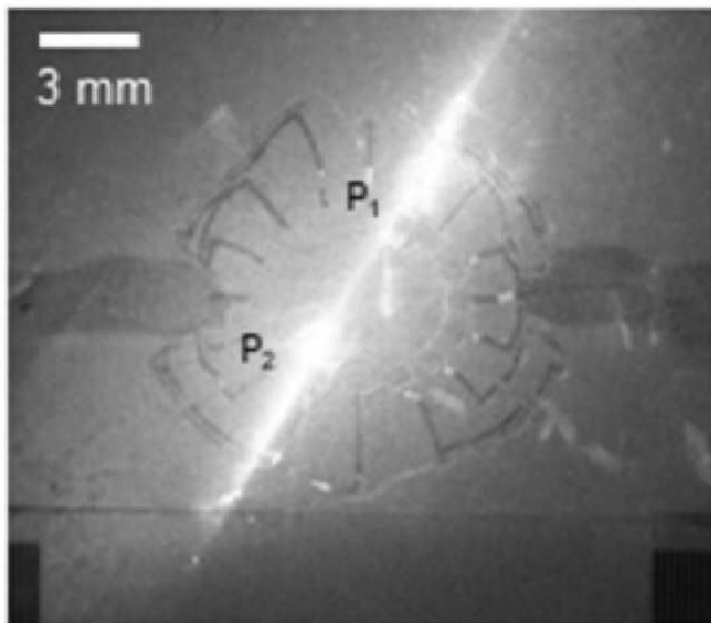
도면14a



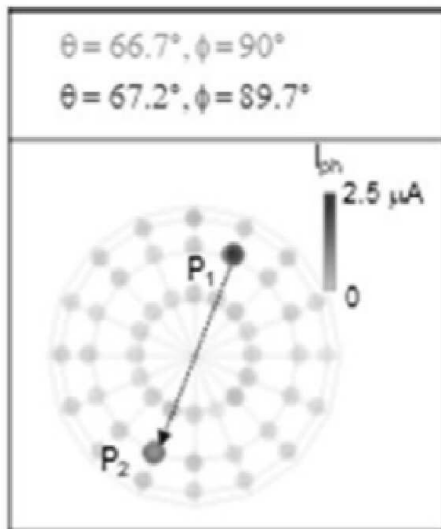
도면14b



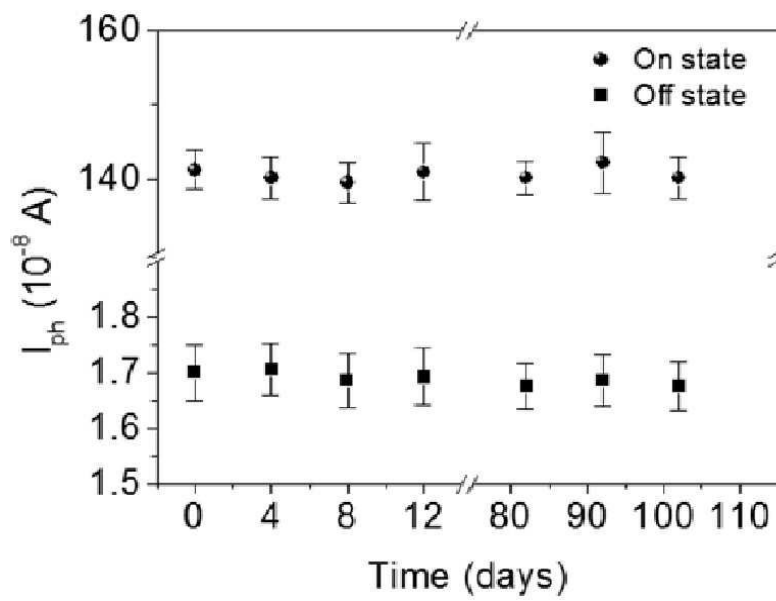
도면14c



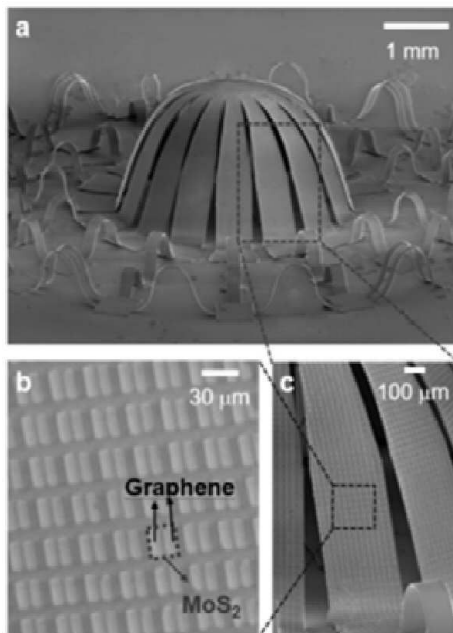
도면14d



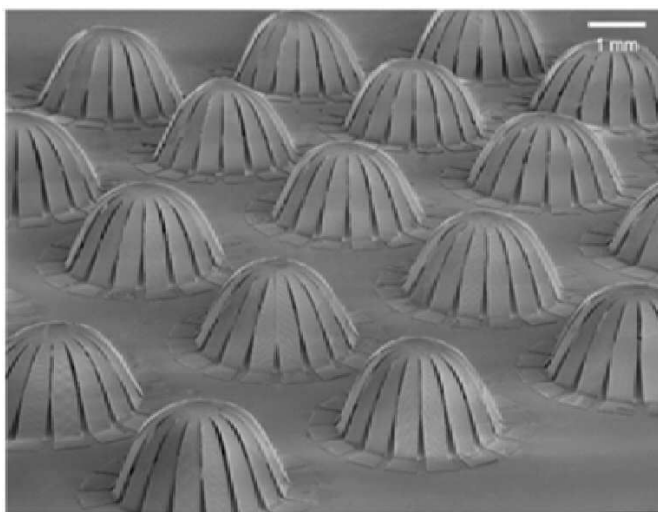
도면15



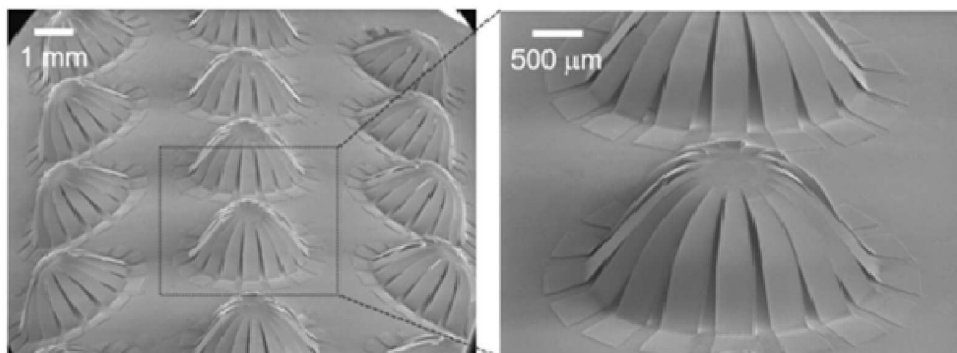
도면16a



도면16b

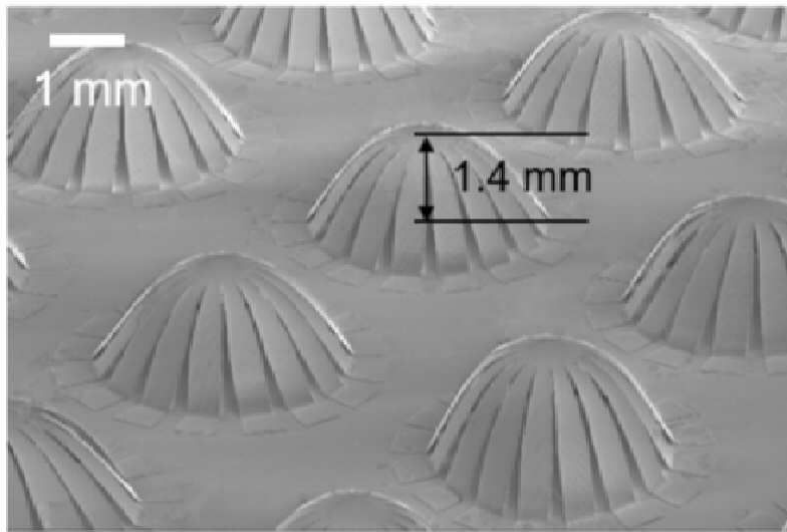


도면17



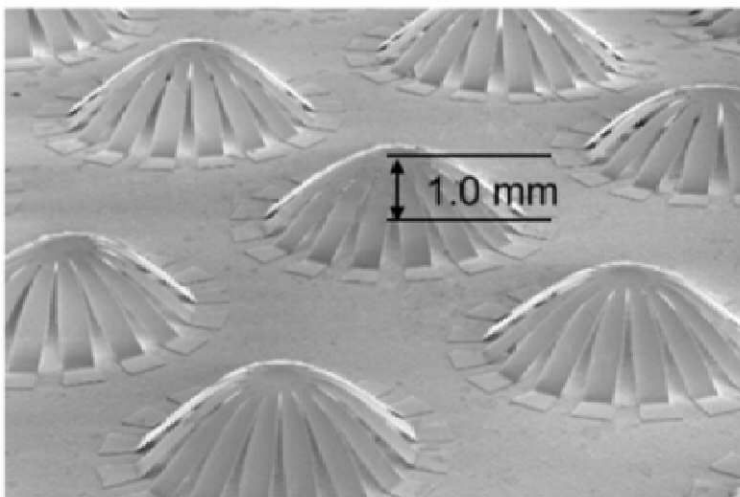


도면18a



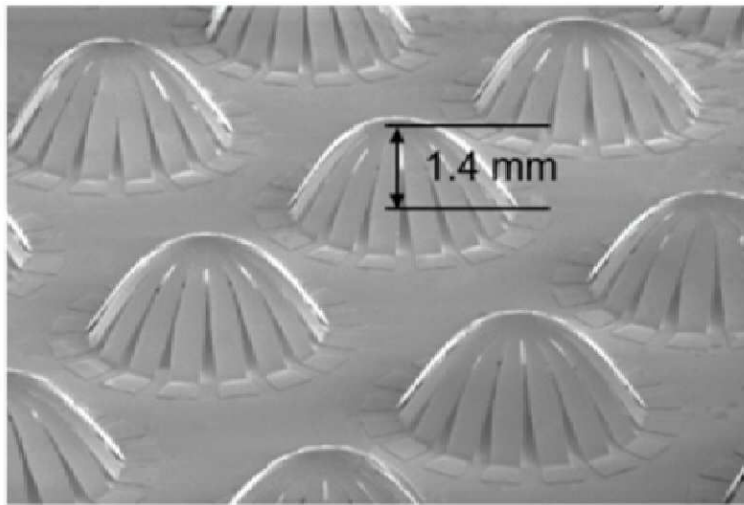
Tensile strain : 0%, Height : 1.4 mm

도면18b



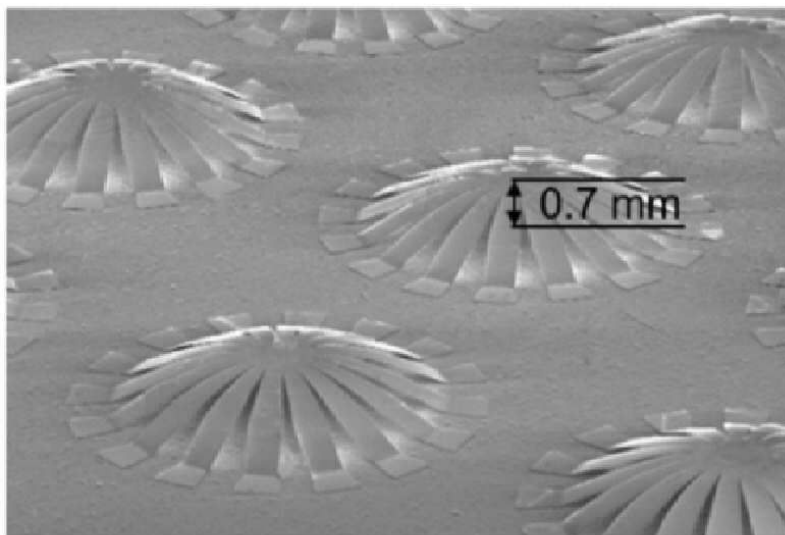
Tensile strain : 20%, Height : 1.0 mm

도면18c



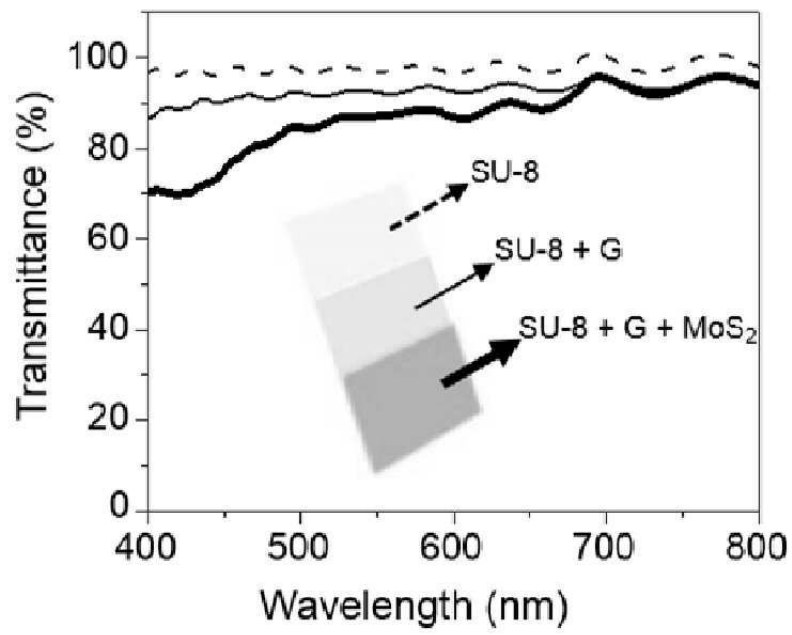
Tensile strain : 0%, Height : 1.4 mm

도면18d

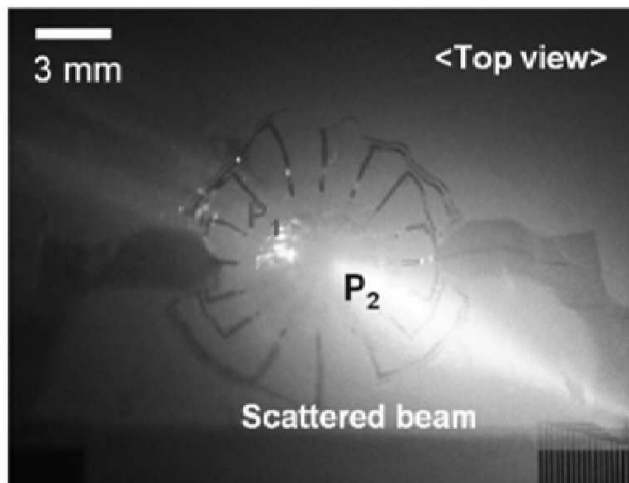


Tensile strain : 30%, Height : 0.7 mm

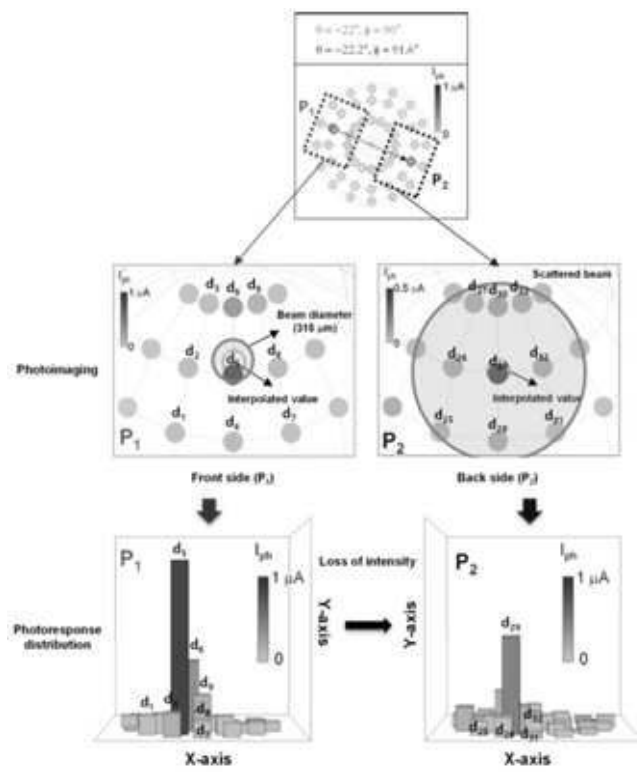
도면19



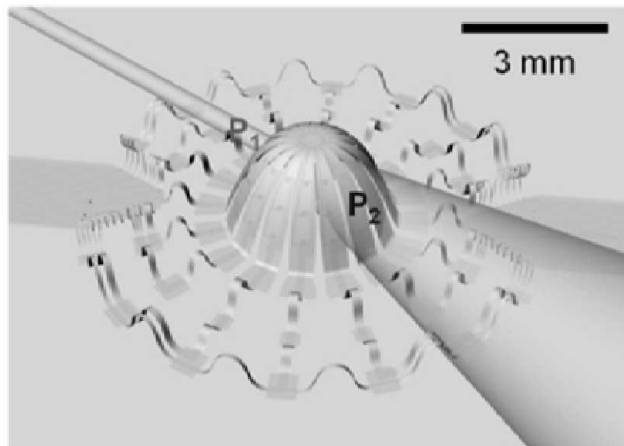
도면20a



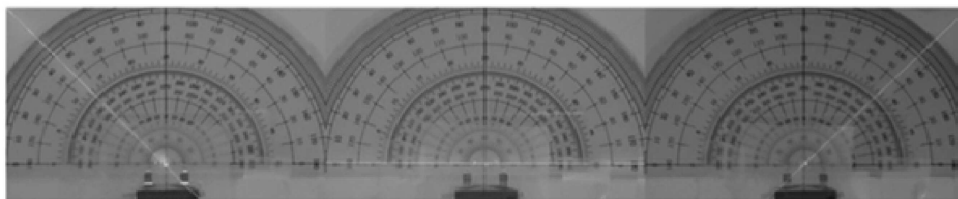
도면20b



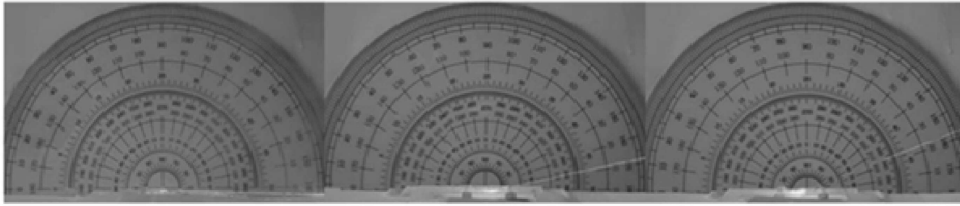
도면20c



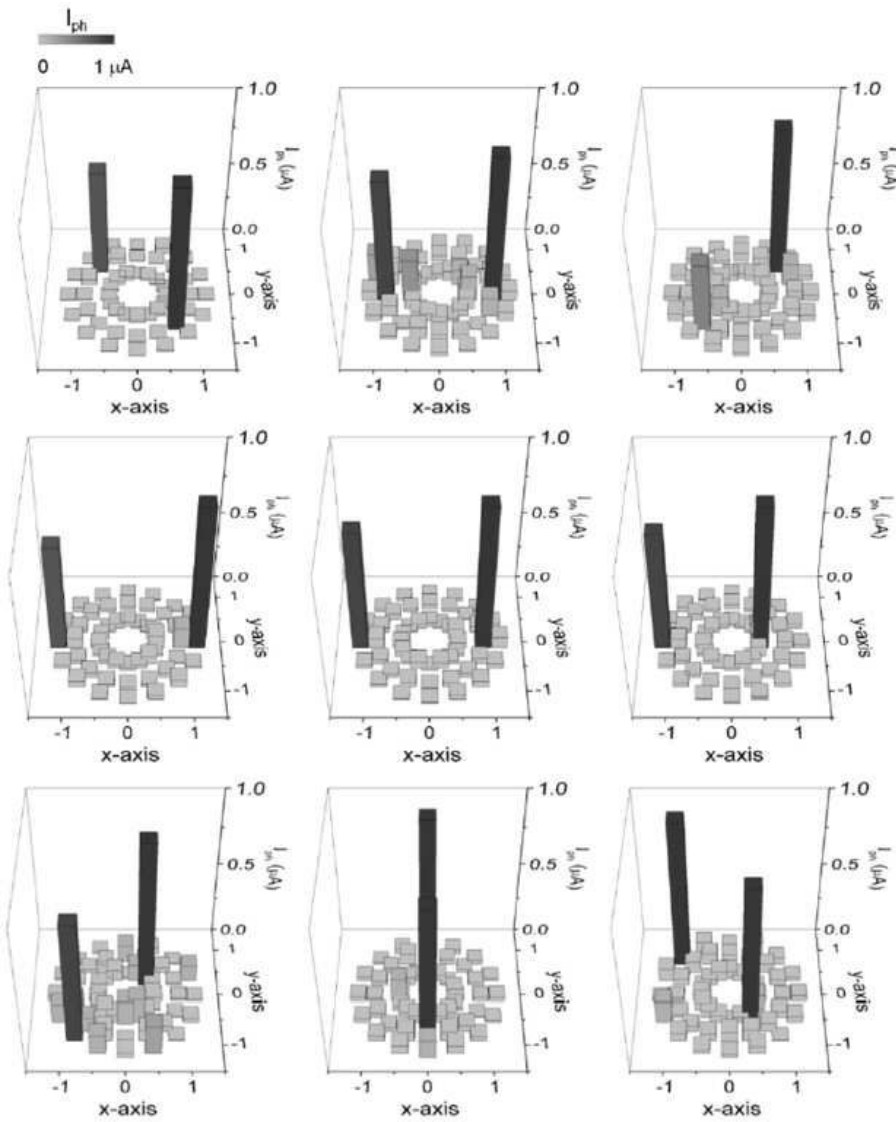
도면21a



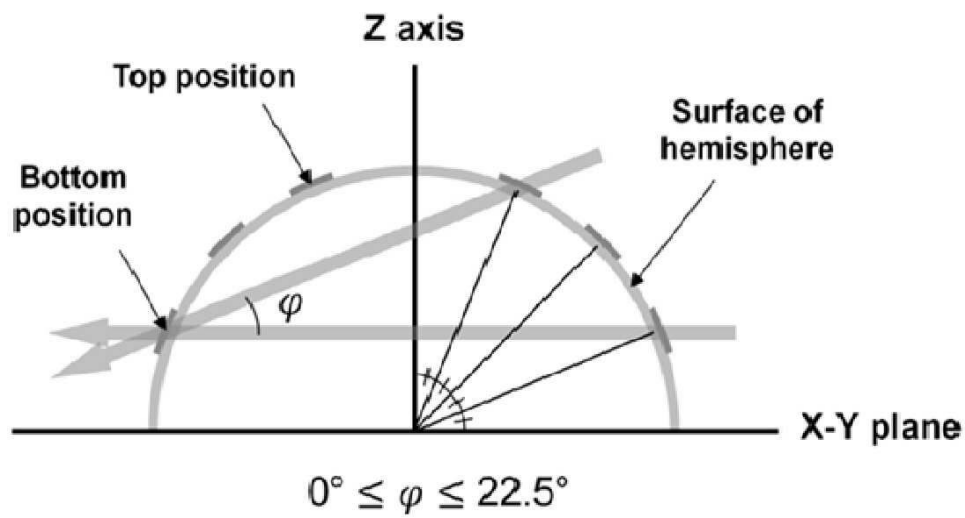
도면21b



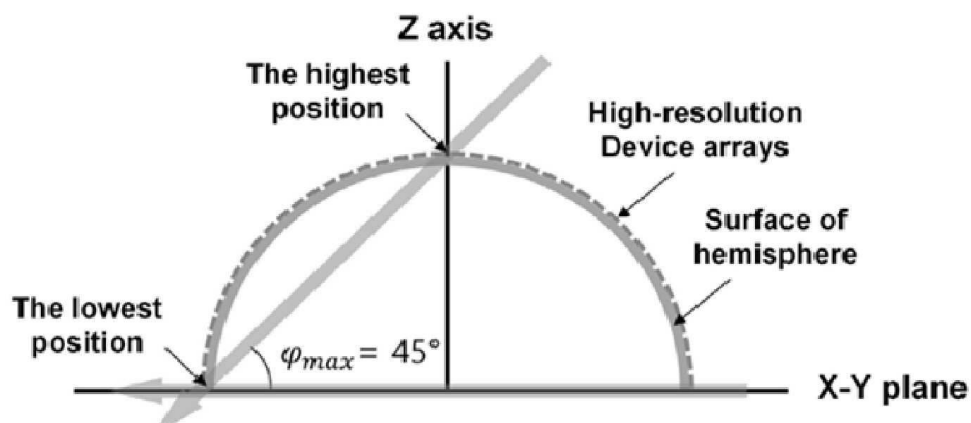
도면22



도면23a

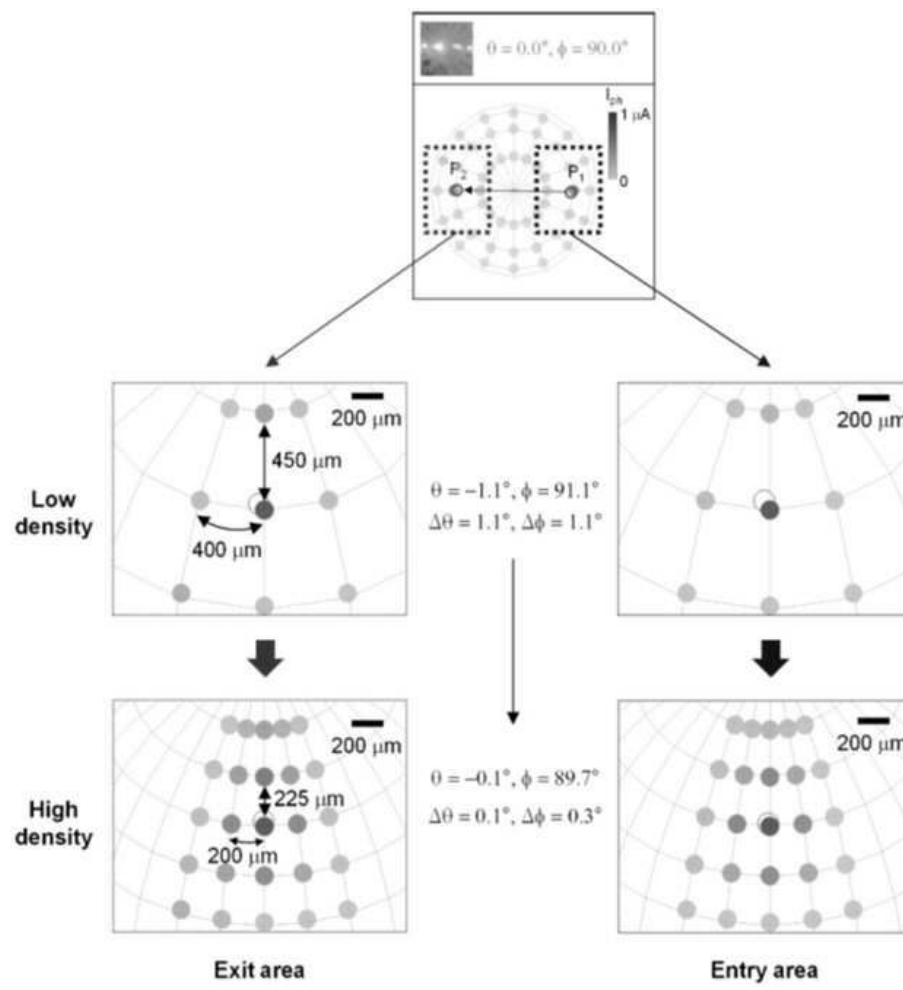


도면23b

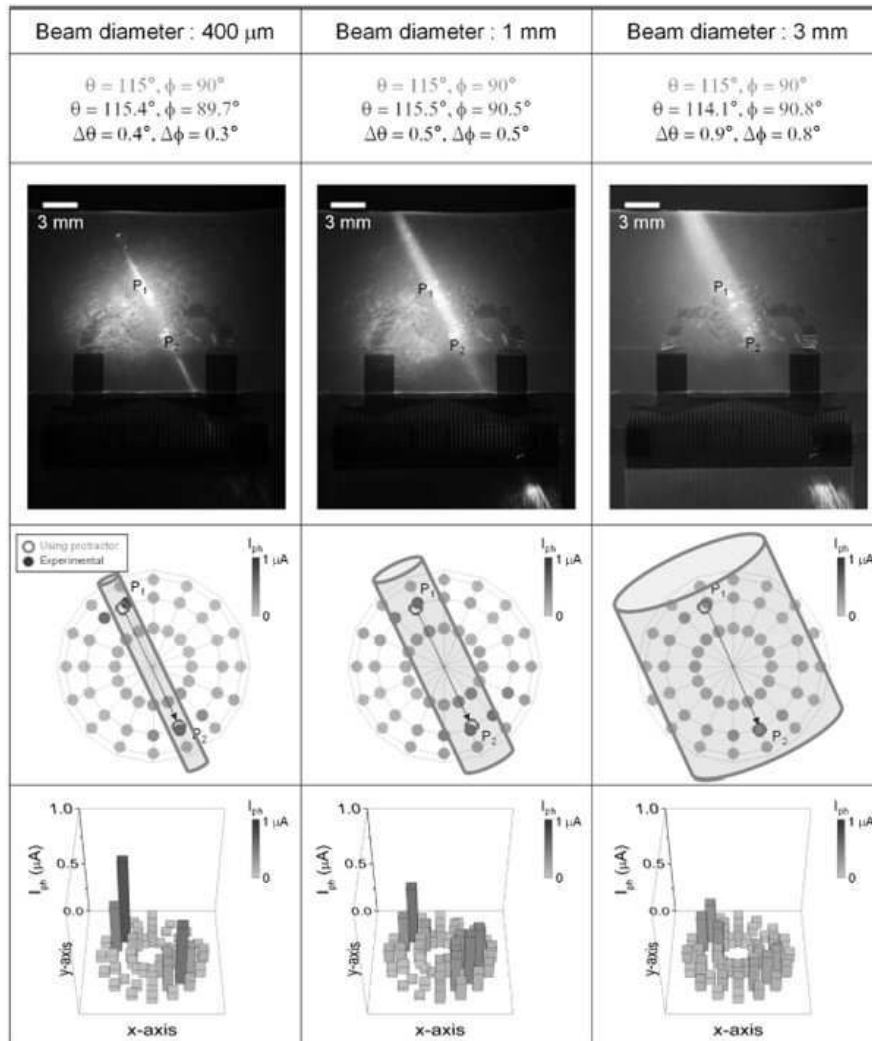




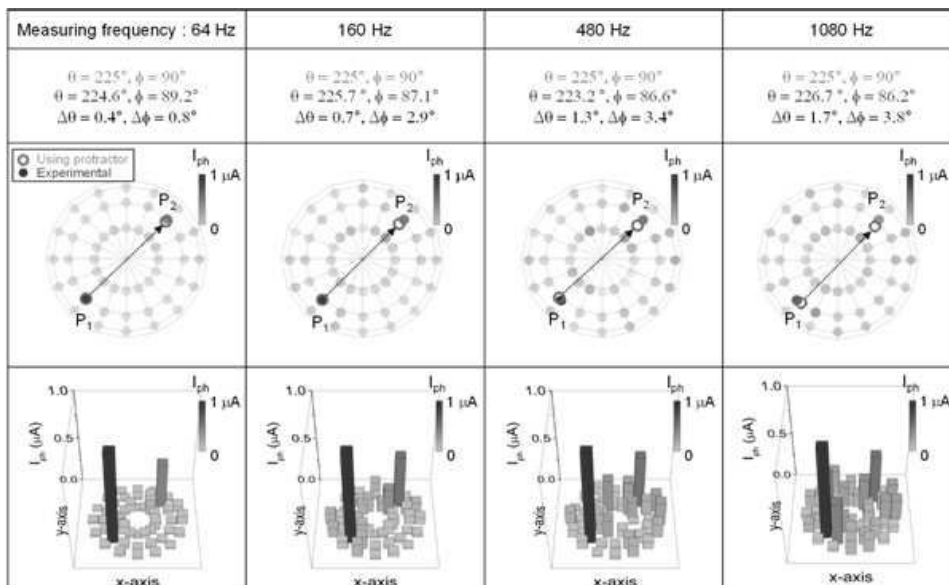
도면24



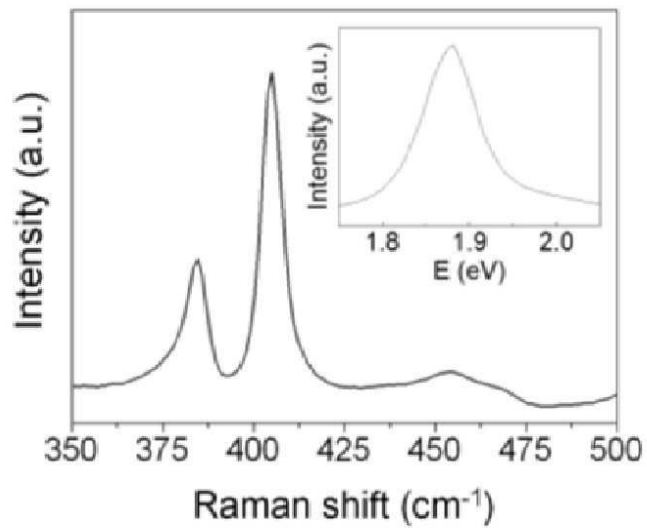
도면25



도면26



도면27a



도면27b

