



(19) 대한민국특허청(KR)

(12) 등록특허공보(B1)

(45) 공고일자 2020년10월19일

(11) 등록번호 10-2167738

(24) 등록일자 2020년10월13일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)

H01L 33/04 (2010.01) H01L 33/00 (2010.01)

H01L 33/26 (2010.01) H01L 33/36 (2010.01)

(52) CPC특허분류

H01L 33/04 (2013.01)

H01L 33/002 (2013.01)

(21) 출원번호 10-2019-0059784

(22) 출원일자 2019년05월22일

심사청구일자 2019년05월22일

(56) 선행기술조사문헌

KR1020180117762 A

KR1020170001160 A

W02018094397 A1

W02018017524 A1

(73) 특허권자

연세대학교 산학협력단

서울특별시 서대문구 연세로 50 (신촌동, 연세대학교)

(72) 발명자

이관형

서울특별시 서대문구 독립문로8길 54 천연뜨란채 106-1501

류희제

서울특별시 서대문구 연희로10길 79-19, 203호

(74) 대리인

김권석

전체 청구항 수 : 총 14 항

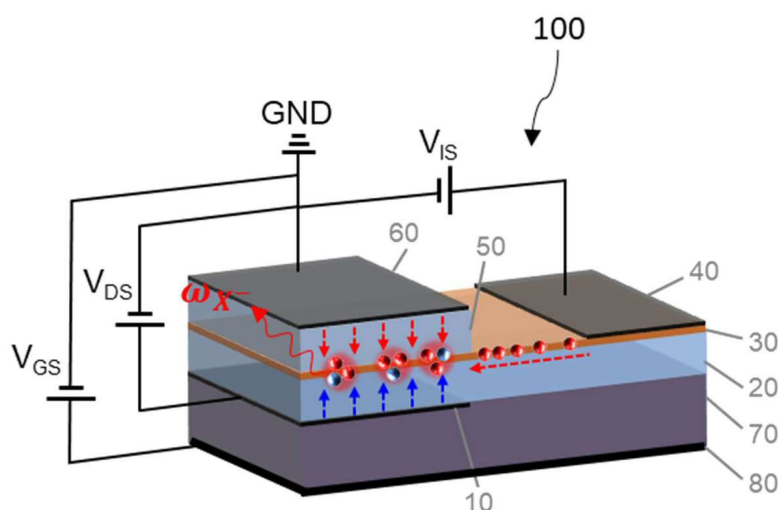
심사관 : 배성주

(54) 발명의 명칭 트라이온 기반 발광 터널 소자 및 발광 터널 소자의 제조 방법

## (57) 요약

본 발명의 실시예들은 양자 우물 구조를 포함하는 발광 소자 및 그 제조 방법에 관한 것이다. 본 발명의 일 실시예에 따른 발광 소자는, 양전하 주입 층; 음전하 주입 층; 상기 양전하 주입 층과 상기 음전하 주입 층 사이에 배치되며, 상기 양전하 주입 층에 접하는 제 1 절연 층, 상기 음전하 주입 층에 접하는 제 2 절연 층, 및 상기 제 1 절연 층과 상기 제 2 절연 층 사이의 전이금속 디칼코제나이드(Transition Metal Dichalcogenide; TMD) 층을 갖는 양자 우물 구조; 및 상기 TMD 층에 음전하를 공급하기 위해 상기 TMD 층의 적어도 일부에 접하는 음전하 공급 층을 포함할 수 있다.

대표도 - 도1a



(52) CPC특허분류

*H01L 33/005* (2013.01)

*H01L 33/26* (2013.01)

*H01L 33/36* (2013.01)

---

## 명세서

### 청구범위

#### 청구항 1

양전하 주입 층;

음전하 주입 층;

상기 양전하 주입 층과 상기 음전하 주입 층 사이에 배치되며, 상기 양전하 주입 층에 접하는 제 1 절연 층, 상기 음전하 주입 층에 접하는 제 2 절연 층, 및 상기 제 1 절연 층과 상기 제 2 절연 층 사이의 전이금속 디칼코게나이드(Transition Metal Dichalcogenide; TMD) 층을 갖는 양자 우물 구조; 및

상기 TMD 층에 음전하를 공급하기 위해 상기 TMD 층의 적어도 일부에 접하는 음전하 공급 층

을 포함하는 발광 소자.

#### 청구항 2

제 1 항에 있어서,

상기 TMD 층은,

상기 양자 우물 구조를 구성하며 양전하와 음전하의 재결합(recombination)에 의해 발광하는 발광부; 및

상기 발광부로부터 연장된 확장부

를 포함하고,

상기 음전하 공급 층은 상기 TMD 층의 상기 확장부에 접하는 발광 소자.

#### 청구항 3

제 2 항에 있어서,

전계에 의해 상기 TMD 층의 상기 확장부로부터 상기 발광부로 공급되는 음전하의 양을 제어하기 위한 제어 전극; 및

상기 제어 전극과 상기 TMD 층 사이에 배치된 제 3 절연층

을 더 포함하는 발광 소자.

#### 청구항 4

제 1 항에 있어서,

상기 양전하 주입 층과 상기 음전하 주입 층 사이에 인가된 전압( $V_{DS}$ )에 의해, 양전하가 상기 양전하 주입 층 및 상기 제 1 절연층을 통하여 상기 TMD 층으로 주입되고, 음전하가 상기 음전하 주입 층 및 상기 제 2 절연층을 통하여 상기 TMD 층으로 주입되어, 양전하와 음전하의 재결합에 의해 발광하는 발광 소자

#### 청구항 5

제 3 항에 있어서,

상기 제어 전극에 인가된 전압( $V_{GS}$ )에 따라, 상기 TMD 층의 상기 확장부로부터 상기 발광부로 공급되는 음전하의 양이 제어되는 발광 소자.

#### 청구항 6

제 3 항에 있어서,

상기 제어 전극에 인가된 전압( $V_{GS}$ )에 따라, 상기 TMD 층의 발광 파장 및 발광 강도가 변화하는 발광 소자.

#### 청구항 7

제 6 항에 있어서,

상기 제어 전극에 인가된 전압( $V_{GS}$ )이 클수록 트라이온에 의한 발광이 증가하는 발광 소자.

#### 청구항 8

제 1 항에 있어서,

상기 양전하 주입 층, 상기 음전하 주입 층 및 상기 음전하 공급 층 중 하나 이상은 그래핀을 포함하는 발광 소자.

#### 청구항 9

제 1 항에 있어서,

상기 TMD 층은  $MoS_2$ ,  $WS_2$  및  $WSe_2$  중 어느 하나를 포함하는 발광 소자.

#### 청구항 10

양전하 주입 층을 형성하는 단계;

상기 양전하 주입층 상에 제 1 절연 층을 형성하는 단계;

상기 제 1 절연 층 상에 전이금속 디칼코제나이드(Transition Metal Dichalcogenide; TMD) 층을 형성하는 단계;

상기 TMD 층 상에 제 2 절연 층을 형성하는 단계;

상기 제 2 절연 층 상에 음전하 주입 층을 형성하는 단계; 및

상기 TMD 층에 음전하를 공급하기 위해 상기 TMD 층의 적어도 일부에 접하는 음전하 공급 층을 형성하는 단계를 포함하고,

상기 제 1 절연 층, 상기 TMD 층 및 상기 제 2 절연 층은 양자 우물(QW: Quantum Well) 구조를 형성하는 발광 소자의 제조 방법.

#### 청구항 11

제 10 항에 있어서,

상기 TMD 층을 형성하는 단계는, 상기 양자 우물 구조를 구성하며 양전하와 음전하의 재결합(recombination)에 의해 발광하는 발광부와, 상기 발광부로부터 연장된 확장부를 형성하는 단계를 포함하고,

상기 음전하 공급 층을 형성하는 단계에서는, 상기 TMD 층의 상기 확장부에 접하도록 상기 음전하 공급 층이 형성되는 발광 소자의 제조 방법.

#### 청구항 12

제 11 항에 있어서,

전계에 의해 상기 TMD 층의 상기 확장부로부터 상기 발광부로 공급되는 음전하의 양을 제어하기 위한 제어 전극을 형성하는 단계; 및

상기 제어 전극과 상기 TMD 층 사이에 제 3 절연 층을 형성하는 단계

를 더 포함하는 발광 소자의 제조 방법.

#### 청구항 13

제 10 항에 있어서,

상기 양전하 주입 층, 상기 음전하 주입 층 및 상기 음전하 공급 층은 그래핀을 포함하는 발광 소자의 제조 방법.

#### 청구항 14

제 10 항에 있어서,

상기 TMD 층은  $\text{MoS}_2$ ,  $\text{WS}_2$  및  $\text{WSe}_2$  중 어느 하나를 포함하는 발광 소자의 제조 방법.

### 발명의 설명

#### 기술 분야

[0001] 본 발명은 발광 소자 및 발광 소자의 제조 방법에 관한 것으로서, 더욱 상세하게는, 양자 우물 구조를 포함하는 발광 소자 및 그 제조 방법에 관한 것이다.

#### 배경 기술

[0002] 전이금속 디칼코제나이드(Transition Metal Dichalcogenide: TMD)는 삼중 원자층(triple atomic layer)이 단일 층을 이루며 탄소 원자 한 층으로 이루어진 그래핀(Graphene)과 유사한 판상 구조를 갖는 물질이다. 준금속의 특성을 가지는 그래핀과 달리 전이금속 디칼코제나이드는 1-2eV의 밴드갭을 가지기 때문에 발광 소자로의 응용에 적합하다. 또한 전이금속 디칼코제나이드는 단일층이 되면 직접 밴드갭을 나타내며 이러한 특성은 2차원에서의 양자 구속 효과와 함께 매우 얇은 두께에도 불구하고 높은 발광 양자효율을 가질 수 있게 한다. 2차원 물질은 반데르발스힘으로 층이 결합된 구조를 가지므로 박리할 수도 있지만 다양한 2차원 물질을 적층할 경우 결정 형태와 관계없이 이중의 2차원 물질을 헤테로 구조로 제작할 수 있는 장점이 있다. 따라서 다양한 밴드 구조를 가지는 2차원 물질을 적층하여 양자 우물 구조를 형성할 수 있고, 양자 우물 내에 주입된 전자와 정공의 높은 재결합 확률을 통해 높은 발광 양자효율을 가지는 발광 소자를 제작할 수 있다.

[0003] 종래 기술에서는, 양자 우물 구조를 갖는 발광 소자의 경우에, 터널 전류의 변화시켜 발광 강도를 변화시킬 수 있었지만, 발광 소자의 발광 파장 및 발광 강도를 함께 제어할 수 없었다.

[0004] 또한, 양자 우물 구조를 갖는 발광 소자의 경우에, 한 개의 전자와 한 개의 정공이 결합된 엑시톤(exciton)의 재결합이 주요한 발광의 메커니즘으로 연구되어 왔고, 두 개의 전자와 한 개의 정공, 또는 한 개의 전자와 두 개의 정공이 결합된 형태의 트라이온(trion, charged exciton)에 의한 발광은 저온의 조건에서 발광 소자를 동작해야 한다는 제약이 존재하였다.

### 발명의 내용

#### 해결하려는 과제

[0005] 발명이 이루고자 하는 기술적 과제는, 빠른 발광 속도를 갖고 투명하고 플렉서블한 발광 소자로서, 발광 파장 및 발광 강도의 조절이 가능한 발광 소자를 제공하는 것이다.

[0006] 또한, 본 발명이 이루고자 하는 다른 기술적 과제는, 빠른 발광 속도를 갖고 투명하고 플렉서블한 발광 소자로서, 상온에서도 트라이온에 의한 발광이 가능한 발광 소자를 제공하는 것이다.

[0007] 또한, 본 발명이 이루고자 하는 다른 기술적 과제는, 빠른 발광 속도를 갖고 투명하고 플렉서블한 발광 소자로서, 발광 파장 및 발광 강도의 조절이 가능하고, 상온에서도 트라이온에 의한 발광이 가능한 발광 소자의 제조 방법을 제공하는 것이다.

#### 과제의 해결 수단

[0008] 상기 기술적 과제를 해결하기 위한 수단으로서, 본 발명의 실시예에서는, 양전하 주입 층; 음전하 주입 층; 상기 양전하 주입 층과 상기 음전하 주입 층 사이에 배치되며, 상기 양전하 주입 층에 접하는 제 1 절연 층, 상기 음전하 주입 층에 접하는 제 2 절연 층, 및 상기 제 1 절연 층과 상기 제 2 절연 층 사이의 전이금속 디칼코제나이드(Transition Metal Dichalcogenide; TMD) 층을 갖는 양자 우물 구조; 및 상기 TMD 층에 음전하를 공급하기 위해 상기 TMD 층의 적어도 일부에 접하는 음전하 공급 층을 포함하는 발광 소자가 제공될 수 있다.

- [0009] 일 실시예에서, 상기 TMD 층은, 상기 양자 우물 구조를 구성하며 양전하와 음전하의 재결합(recombination)에 의해 발광하는 발광부; 및 상기 발광부로부터 연장된 확장부를 포함하고, 상기 음전하 공급 층은 상기 TMD 층의 상기 확장부에 접할 수 있다.
- [0010] 일 실시예에서, 전계에 의해 상기 TMD 층의 상기 확장부로부터 상기 발광부로 공급되는 음전하의 양을 제어하기 위한 제어 전극; 및 상기 제어 전극과 상기 TMD 층 사이에 배치된 제 3 절연층을 더 포함할 수 있다.
- [0011] 일 실시예에서, 상기 양전하 주입 층과 상기 음전하 주입 층 사이에 인가된 전압(VDS)에 의해, 양전하가 상기 양전하 주입 층 및 상기 제 1 절연층을 통하여 상기 TMD 층으로 주입되고, 음전하가 상기 음전하 주입 층 및 상기 제 2 절연층을 통하여 상기 TMD 층으로 주입되어, 양전하와 음전하의 재결합에 의해 발광할 수 있다.
- [0012] 일 실시예에서, 상기 제어 전극에 인가된 전압(VGS)에 따라, 상기 TMD 층의 상기 확장부로부터 상기 발광부로 공급되는 음전하의 양이 제어될 수 있다.
- [0013] 일 실시예에서, 상기 제어 전극에 인가된 전압(VGS)에 따라, 상기 TMD 층의 발광 파장 및 발광 강도가 변화할 수 있다.
- [0014] 일 실시예에서, 상기 제어 전극에 인가된 전압(VGS)이 클수록 트라이온에 의한 발광이 증가할 수 있다.
- [0015] 일 실시예에서, 상기 양전하 주입 층, 상기 음전하 주입 층 및 상기 음전하 공급 층 중 하나 이상은 그래핀을 포함할 수 있다.
- [0016] 일 실시예에서, 상기 TMD 층은 MoS<sub>2</sub>, WS<sub>2</sub> 및 WSe<sub>2</sub> 중 어느 하나를 포함할 수 있다.
- [0017] 상기 기술적 과제를 해결하기 위한 수단으로서, 본 발명의 다른 실시예에서는, 양전하 주입 층을 형성하는 단계; 상기 양전하 주입층 상에 제 1 절연 층을 형성하는 단계; 상기 제 1 절연 층 상에 전이금속 디칼코제나이드(Transition Metal Dichalcogenide; TMD) 층을 형성하는 단계; 상기 TMD 층 상에 제 2 절연 층을 형성하는 단계; 상기 제 2 절연 층 상에 음전하 주입 층을 형성하는 단계; 및 상기 TMD 층에 음전하를 공급하기 위해 상기 TMD 층의 적어도 일부에 접하는 음전하 공급 층을 형성하는 단계를 포함하고, 상기 제 1 절연 층, 상기 TMD 층 및 상기 제 2 절연 층은 양자 우물(QW: Quantum Well) 구조를 형성하는 발광 소자의 제조 방법이 제공될 수 있다.
- [0018] 일 실시예에서, 상기 TMD 층을 형성하는 단계는, 상기 양자 우물 구조를 구성하며 양전하와 음전하의 재결합(recombination)에 의해 발광하는 발광부와, 상기 발광부로부터 연장된 확장부를 형성하는 단계를 포함하고, 상기 음전하 공급 층을 형성하는 단계에서는, 상기 TMD 층의 상기 확장부에 접하도록 상기 음전하 공급 층이 형성될 수 있다.
- [0019] 일 실시예에서, 전계에 의해 상기 TMD 층의 상기 확장부로부터 상기 발광부로 공급되는 음전하의 양을 제어하기 위한 제어 전극을 형성하는 단계; 및 상기 제어 전극과 상기 TMD 층 사이에 제 3 절연 층을 형성하는 단계를 더 포함할 수 있다.
- [0020] 일 실시예에서, 상기 양전하 주입 층, 상기 음전하 주입 층 및 상기 음전하 공급 층은 그래핀을 포함할 수 있다.
- [0021] 일 실시예에서, 상기 TMD 층은 MoS<sub>2</sub>, WS<sub>2</sub> 및 WSe<sub>2</sub> 중 어느 하나를 포함할 수 있다.

### 발명의 효과

- [0022] 본 발명의 실시예에 따르면, 2차원 물질에 의해 헤테로 구조의 발광 소자를 제조하고, 발광 소자의 양자 우물을 구성하는 층에 직접 음전하를 공급함으로써, 빠른 발광 속도를 갖고 투명하고 플렉서블한 발광 소자로서, 발광 파장 및 발광 강도를 조절이 가능한 발광 소자 및 그 제조 방법이 제공될 수 있다.
- [0023] 또한, 본 발명의 실시예에 따르면, 2차원 물질에 의해 헤테로 구조의 발광 소자를 제조하고, 발광 소자의 양자 우물을 구성하는 층에 직접 음전하를 공급함으로써, 빠른 발광 속도를 갖고 투명하고 플렉서블한 발광 소자로서, 상온에서도 트라이온에 의한 발광이 가능한 발광 소자 및 그 제조 방법이 제공될 수 있다.

### 도면의 간단한 설명

- [0024] 도 1a는 본 발명의 실시예에 따른 발광 소자의 단면도 및 전자가 발광 영역으로 주입되는 것을 도시하는 모식도

를 나타낸다.

도 1b는 본 발명의 실시예에 따른 발광 조사의 단면도 및 전자가 발광 영역으로부터 추출되는 것을 도시하는 모식도를 나타낸다.

도 1c는 본 발명의 실시예에 따른 발광 소자의 발광부의 전자 밀도가 높아지는 경우의 밴드 다이어그램이다.

도 1d는 본 발명의 실시예에 따른 발광 소자의 발광부의 전자 밀도가 높지 않은 경우의 밴드 다이어그램이다.

도 2a 및 도 2b는 각각 엑시톤 및 트라이온에 의한 발광의 원리를 나타내는 모식도이다.

도 3은 본 발명의 실시예에 따른 발광 소자의 동작시의 광학 이미지를 나타내는 도면이다.

도 4a 및 도 4b는 본 발명의 실시예에 따른 발광 소자의 제어 전극에 인가되는 전압에 따른 발광 강도 및 발광 파장의 변화를 나타내는 발광 스펙트럼과 트라이온 및 엑시톤의 발광 강도의 변화를 나타내는 그래프이다.

도 5는 본 발명의 실시예에 따른 발광 소자의 제조 방법을 나타내는 흐름도이다.

### 발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

- [0025] 이하, 첨부된 도면을 참조하여 본 발명의 바람직한 실시예를 상세히 설명하기로 한다.
- [0026] 본 발명의 실시예들은 당해 기술 분야에서 통상의 지식을 가진 자에게 본 발명을 더욱 완전하게 설명하기 위하여 제공되는 것이며, 하기 실시예는 여러 가지 다른 형태로 변형될 수 있으며, 본 발명의 범위가 하기 실시예에 한정되는 것은 아니다. 오히려, 이들 실시예는 본 개시를 더욱 충실하고 완전하게 하고, 당업자에게 본 발명의 사상을 완전하게 전달하기 위하여 제공되는 것이다.
- [0027] 도면에서 동일 부호는 동일한 요소를 지칭한다. 또한, 본 명세서에서 사용된 바와 같이, 용어 "및/또는"은 해당 열거된 항목 중 어느 하나 및 하나 이상의 모든 조합을 포함한다.
- [0028] 본 명세서에서 사용된 용어는 실시예를 설명하기 위하여 사용되며, 본 발명의 범위를 제한하기 위한 것이 아니다. 또한, 본 명세서에서 단수로 기재되어 있다 하더라도, 문맥상 단수를 분명히 지적하는 것이 아니라면, 복수의 형태를 포함할 수 있다. 또한, 본 명세서에서 사용되는 "포함한다(comprise)" 및/또는 "포함하는(comprising)"이란 용어는 언급한 형상들, 숫자, 단계, 동작, 부재, 요소 및/또는 이들 그룹의 존재를 특정하는 것이며, 다른 형상, 숫자, 동작, 부재, 요소 및/또는 그룹들의 존재 또는 부가를 배제하는 것이 아니다. 또한, 본 명세서에서 기판 또는 다른 층 "상에(on)" 형성된 층에 대한 언급은 상기 기판 또는 다른 층의 바로 위에 형성된 층을 지칭하거나, 상기 기판 또는 다른 층 상에 형성된 중간층 또는 중간층들 상에 형성된 층을 지칭할 수 있다.
- [0030] 도 1a는 본 발명의 실시예에 따른 발광 소자의 단면도 및 전자가 발광 영역으로 주입되는 것을 도시하는 모식도를 나타내고, 도 1b는 본 발명의 실시예에 따른 발광 소자의 단면도 및 전자가 발광 영역으로부터 추출되는 것을 도시하는 모식도를 나타낸다.
- [0031] 도 1a 및 도 1b를 참조하면, 발광 소자(100)는 기판 상에 양전하 주입 층(10), 제 1 절연층(20), 전이금속 디칼코제나이드(TMD: Transition Metal Dichalcogenide) 층(30), 제2 절연층(50) 및 음전하 주입 층(60)의 적층 구조를 포함할 수 있다. 양전하 주입 층(10)과 음전하 주입 층(60) 사이에 배치되며, 양전하 주입 층(10)에 접하는 제 1 절연 층(20), 음전하 주입 층(60)에 접하는 제 2 절연 층(50), 및 제 1 절연 층(20)과 제 2 절연 층(50) 사이의 TMD 층을 포함하는 적층 구조는 양자 우물 구조를 형성할 수 있다.
- [0032] 양전하 주입 층(10) 및 제 1 절연 층(20)의 일부는 기판(70) 상에 형성될 수 있다. 기판(70)은 사파이어( $Al_2O_3$ ), Si, GaN, SiC, ZnO,  $SiO_2$ , GaP, InP,  $Ga_2O_3$  및 GaAs 등으로 이루어진 군에서 선택된 하나 이상의 재료를 포함할 수 있다. 기판(S)은 가요성 또는 투명한 재료로 구성될 수 있다.
- [0033] 양전하 주입 층(10), 음전하 주입 층(60) 또는 음전하 공급 층(40)은 그래핀을 포함할 수 있다. 양전하 주입 층(10), 음전하 주입 층(60) 또는 음전하 공급 층(40)이 포함하는 그래핀은 프리스틴 그래핀(pristine graphene) 이거나 또는 화학적으로 또는 물리적으로 변형된 그래핀일 수 있다. 화학적으로 또는 물리적으로 변형된 그래핀의 많은 방법이 당업계에 공지되어 있다. 그래핀은 이중 접합 구조에서 전도성이 있고 투명한 매개체로서 기능을 한다. 그래핀 또는 변형된 그래핀은 금속 전도성을 유지하는 것이 중요하다. 그래핀 또는 변형된 그래핀이 투명한 것이 중요하다. "투명"이라는 용어는 전자기 스펙트럼의 가시광선 또는 가시광선 부근의 방

사선을 통과하게 하는 성질을 말한다.

- [0034] 제 1 절연 층(20) 및 제 2 절연 층(50)은 투명한 절연 물질을 포함할 수 있다. 예컨대, 육각형 붕소 질화물(hBN: Hexagonal Boron Nitride), 운모(mica), SiO<sub>2</sub> 등이 이러한 절연 물질로 사용될 수 있고, 기계적 강도 면에서 hBN을 사용하는 것이 바람직하다. 제 1 절연 층(20) 및 제 2 절연 층(50)은 양자 우물 구조의 터널 장벽으로서 기능한다.
- [0035] TMD 층(30)에 포함되는 전이금속 디칼코제나이드(TMD: transition metal dichalcogenide)는 MX<sub>2</sub>(M은 전이금속 원소이고, X는 칼코젠 원소) 형태의 화합물이다. TMD 층(30)에 포함되는 전이금속 디칼코제나이드는 MoS<sub>2</sub>, WS<sub>2</sub> 및 WSe<sub>2</sub> 중 하나를 포함할 수 있다. TMD 층(30)은 단일층(monolayer) 또는 이중층(bilayer) 이상의 복수층으로 형성될 수 있다. 더 나은 양자 구속 효과를 얻기 위해서는 TMD 층(3)을 단일층으로 형성하는 것이 바람직하다.
- [0036] TMD 층(30)은, 양자 우물 구조를 구성하며 양전하와 음전하의 재결합(recombination)에 의해 발광하는 발광부와, 상기 발광부로부터 연장된 확장부를 포함할 수 있다. TMD 층(30)의 확장부는 음전하 공급층(40)으로부터 공급되는 음전하가 TMD 층(30)의 발광부로 공급되는 경로가 될 수 있다.
- [0037] 음전하 공급 층(40)은 전압(V<sub>IS</sub>)의 인가에 의해 음전하의 이동이 가능한 여하의 도전성 재료를 포함할 수 있다. 음전하 공급 층(40)으로서 그래핀을 사용하는 경우에는 땀글링 본드 등의 결합이 없고, 2차원 물질인 TMD 층(30)과의 양호한 계면을 얻을 수 있다. 음전하 공급 층(40)은 TMD 층(30)의 확장부에 접하도록 구성될 수 있다.
- [0038] 또한, 발광 소자(100)는, 전계에 의해 TMD 층(30)의 확장부로부터 발광부로 공급되는 음전하의 양을 제어하기 위한 제어 전극(80)과, 제어 전극(80)과 TMD 층(30) 사이에 배치된 제 3 절연층을 포함할 수 있다. 도 1a에 도시된 실시예에서는 기관(70)이 제 3 절연층으로 기능하는 것이 도시되어 있다.
- [0039] 제어 전극(80)에 인가되는 전압에 의해 제어 전극(80)과 TMD 층(30) 사이에 전계가 형성되며, 형성된 전계에 의해 TMD 층(30)의 확장부로부터 발광부로 공급되는 음전하의 양이 제어될 수 있다. 제어 전극(80)은 도전성 금속을 포함할 수 있고, 도전성 금속으로서 예를 들면 구리(Cu), 니켈(Ni), 은(Ag), 크롬(Cr), 철(Fe) 또는 코발트(Co) 등이 사용될 수 있다. 또는, 제어 전극(80)을 투명도가 높은 금속, 예를 들면 ITO, AZO(ZnO:Al), GIO((Ga, In)<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), ZTO(ZnSnO<sub>3</sub>), MIO(MgIn<sub>2</sub>O<sub>4</sub>) 또는 ZIO(Zn<sub>2</sub>In<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)로 형성할 수 있다.
- [0040] 제어 전극(80)의 형성 위치는 도 1a 및 도 1b에 도시된 실시예에 한정되지 않는다. 제어 전극(80)은 전계에 의해 TMD 층(30)의 확장부로부터 발광부로 공급되는 음전하의 양을 제어가능한 여하의 위치에 배치될 수 있다. 예를 들어, 도 1a 및 도 1b에 도시된 바와 같이, 절연층으로 기능하는 기관(70)의 하부 표면에 제어 전극(80)이 형성될 수도 있다. 다른 실시예에서는 기관(70)과 양전하 주입 층(10) 및 TMD 층(20) 사이에 제 3 절연 층을 형성하고, 기관(70)에 직접 전압이 인가되도록 하여 기관(70)이 제어 전극으로 기능하도록 할 수 있다. 또는, 음전하 주입층(60)과 음전하 공급 층(40) 사이의 TMD 층(30) 상에 제어 전극(80)이 배치되고, 제 3 절연층은 음전하 주입층(60)과 음전하 공급 층(40) 사이의 TMD 층(30)의 상부면에 접하도록 형성될 수 있다.
- [0041] 도 1a 및 도 1b를 참조하면, 양전하 주입 층(10)의 전압이 음전하 주입 층(60)의 전압 보다 큰 바이어스 전압(V<sub>DS</sub>)이 양전하 주입 층(10)과 음전하 주입 층(60) 사이에 인가되면, 양전하 주입 층(10)에 제 1 캐리어로서 양전하가 공급되고, 음전하 주입 층(60)에 제 2 캐리어로서 음전하가 공급된다. 양전하는 전기적으로 전도성을 갖는 양전하 주입 층(10)으로부터 터널링 효과에 의해 전기적으로 전도성을 갖지 않는 제 1 절연 층(20)을 통과하여 TMD 층(30)에 주입된다. 또한, 음전하는 전기적으로 전도성을 갖는 음전하 주입 층(60)으로부터 터널링 효과에 의해 전기적으로 전도성을 갖지 않는 제2 절연층(50)을 통과하여 TMD 층(30)에 주입된다. 주입된 양전하 및 음전하가 TMD 층(30)에서 재결합(recombination)하면 전계 발광(EL: Electro Luminescence)이 나타나게 된다.
- [0042] 도 1a를 참조하면, 음전하 공급 층(40)에 인가된 전압(V<sub>IS</sub>)이 0 보다 작은 경우에, 음전하가 음전하 공급 층(40)을 통하여 TMD 층(30)에 공급된다. 또한, TMD 층(30)에 공급된 전자는 척력에 의해 음전하 공급 층(40)으로부터 떨어져 있는, TMD 층(30)의 발광부로 이동한다. TMD 층(30)의 발광부에 전자가 공급되어 양자 우물 구조의 전도대에 더 많은 전자가 축적되면, 후술하는 바와 같이 트라이온(trion)에 의한 발광이 더 우세하게 된다.
- [0043] 도 1b를 참조하면, 음전하 공급 층(40)에 인가된 전압(V<sub>IS</sub>)이 0 보다 큰 전압인 경우에, 음전하가 인력에 의해

음전하 공급 층(40) 근방으로 이동한다. 이동한 음전하는 TMD 층(30)으로부터 추출되고, 음전하 공급 층(40)을 통하여 흘러 나간다. TMD 층(30)의 발광부로부터 전자가 추출되어 양자 우물 구조의 전도대에 더 적은 전자가 존재하면, 엑시톤(exciton)에 의한 발광이 더 우세하게 된다.

[0045] 도 1c는 본 발명의 실시예에 따른 발광 소자에서 TMD 층의 발광부의 전자 밀도가 증가된 경우의 밴드 다이어그램이고, 도 1d는 TMD 층의 발광부의 전자 밀도가 증가되지 않은 경우의 밴드 다이어그램을 나타낸다.

[0046] 본 실시예에서는, 발광 소자(100)의 제 1 절연 층(20) 및 제 2 절연 층(50)으로서 hBN을 사용하고, TMD 층(30)으로서 텅스텐 디셀레나이드(WSe<sub>2</sub>)를 사용하였다.

[0047] 도 1c는, TMD 층(30)의 발광부에 전자가 추가적으로 공급되어 전자 밀도가 증가된 상태를 나타낸다. 전자 밀도가 증가된 상태이므로, 이러한 상태에서는 트라이온에 의한 발광이 엑시톤에 의한 발광 보다 더 우세하게 된다. 도 1d는 TMD 층(30)의 발광부로부터 전자가 추출되어 전자 밀도가 감소된 상태를 나타낸다. 전자 밀도가 감소된 상태이므로, 이러한 상태에서는 엑시톤에 의한 발광이 트라이온에 의한 발광 보다 더 우세하게 된다. 이와 같이, V<sub>IS</sub> 및/또는 V<sub>GS</sub>의 전압의 크기와 부호(+ 또는 -)에 따라서 트라이온에 의한 발광 및 엑시톤에 의한 발광의 비율을 제어할 수 있다.

[0049] 도 2a 및 도 2b는 각각 엑시톤 및 트라이온에 의한 발광의 원리를 나타내는 모식도이다.

[0050] 전자와 정공 사이 쿨롱 상호 작용(coulombic interaction)에 의해 전자와 정공이 결합하여 전자-정공 쌍(electron-hole pair EHP)을 생성할 수 있다. 1 개의 전자와 1 개의 정공이 결합한 전자-정공쌍을 엑시톤(exction)이라고 한다. 엑시톤은 추가적으로 전자 또는 정공과 결합하여 대전된 엑시톤(charged exciton)인 트라이온(trion)이 될 수 있다.

[0051] TMD 층(30)에서는 정공과 전자가 결합하여 엑시톤(exciton) 또는 트라이온(trion)을 형성하고, 엑시톤 또는 트라이온이 여기 상태에서 기저 상태로 전이되면서 광을 발하게 된다.

[0052] 도 2a를 참조하면, 전도대(CB)에 존재하는 하나의 전자와 가전자대(VB)에 존재하는 하나의 정공이 인력에 의해 전자-정공 쌍(엑시톤)을 형성하게 되면, 전도대(CB)에 존재하고 있던 전자가 전도대(CB) 보다 낮은 제 1 에너지 밴드(E<sub>b</sub>)로 이동한다. 전도대(CB)로부터 제 1 에너지 밴드(E<sub>b</sub>)로 이동하는 것은 엑시톤 결합시에 에너지(엑시톤 결합 에너지)가 사용되기 때문이다. 엑시톤을 형성한 전자-정공 쌍이 재결합함으로써 발광이 이루어진다.

[0053] 도 2b를 참조하면, 전도대(CB)에 존재하는 2개의 전자와 가전자대(VB)에 존재하는 하나의 정공이 인력에 의해 전자-정공 쌍(트라이온)을 형성하게 되면, 전도대(CB)에 존재하고 있던 2개의 전자가 제 1 에너지 밴드(E<sub>b</sub>) 보다 낮은 제 2 에너지 밴드(E<sub>T</sub>)로 이동한다. 이것은 엑시톤에 추가로 전자가 결합하면서 안정화되는 과정에서 더 낮은 에너지 상태를 갖기 때문이다. 트라이온을 형성한 전자-정공 쌍이 재결합함으로써 발광이 이루어진다. 광의 에너지는 전자-정공 쌍의 에너지 밴드갭에 비례하며, 트라이온의 에너지 밴드갭이 엑시톤의 에너지 밴드갭 보다 작기 때문에, 트라이온에 의한 발광 파장은 엑시톤에 의한 발광 파장 보다 더 길다.

[0054] 트라이온 형성시의 제 2 에너지 밴드(E<sub>T</sub>)가 엑시톤 형성시의 제 1 에너지 밴드(E<sub>b</sub>) 보다 낮으므로, 종래 기술에서는 트라이온의 형성 및 전자-정공 쌍의 재결합을 위해서 저온 조건이 필요하였고, 이에 따라 트라이온 발광 소자는 저온 조건에서 동작하였다. 그러나, 본 발명의 실시예에 따르면, 음전하 공급 층(40)을 통해 전자를 TMD 층(30)에 직접 공급하여 양자 우물의 전자 밀도를 더 증가시킬 수 있기 때문에 트라이온 발광 소자를 상온에서 동작시킬 수 있다.

[0055] 또한, 종래의 MOSFET 등과 같은 전계 효과 트랜지스터를 이용한 발광 소자는 유전체의 커패시턴스를 높이는 것에 한계가 있었으나, 본 발명에서는 TMD 층(30)에 전자를 직접 공급함으로써 유전체의 커패시턴스의 한계를 극복할 수 있다.

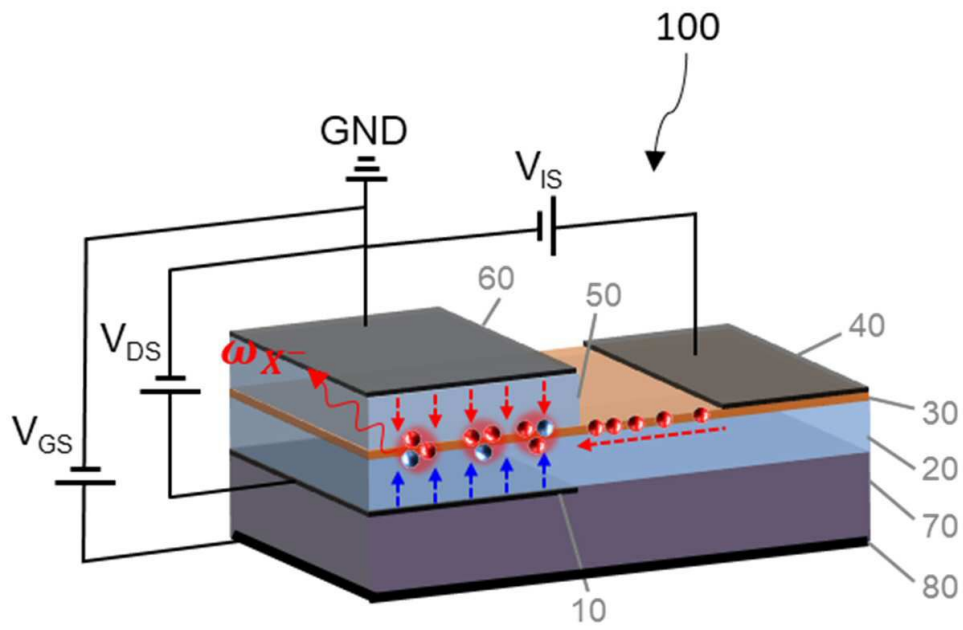
[0057] 도 3은 본 발명의 실시예에 따른 발광 소자(100)의 동작시의 광학 이미지를 나타내는 도면이다. 도 3을 참조하면, 양전하 주입 층(10), 음전하 주입 층(60) 및 TMD 층(30)이 모두 중첩하는 영역에서 발광이 일어나는 것을 확인할 수 있다.

[0059] 도 4a 및 도 4b는 본 발명의 실시예에 따른 발광 소자(100)의 제어 전극(80)에 인가되는 전압(V<sub>GS</sub>)에 따른 발광 강도 및 발광 파장의 변화를 나타내는 발광 스펙트럼과 트라이온 및 엑시톤의 발광 강도의 변화를 나타내는 그래프이다.

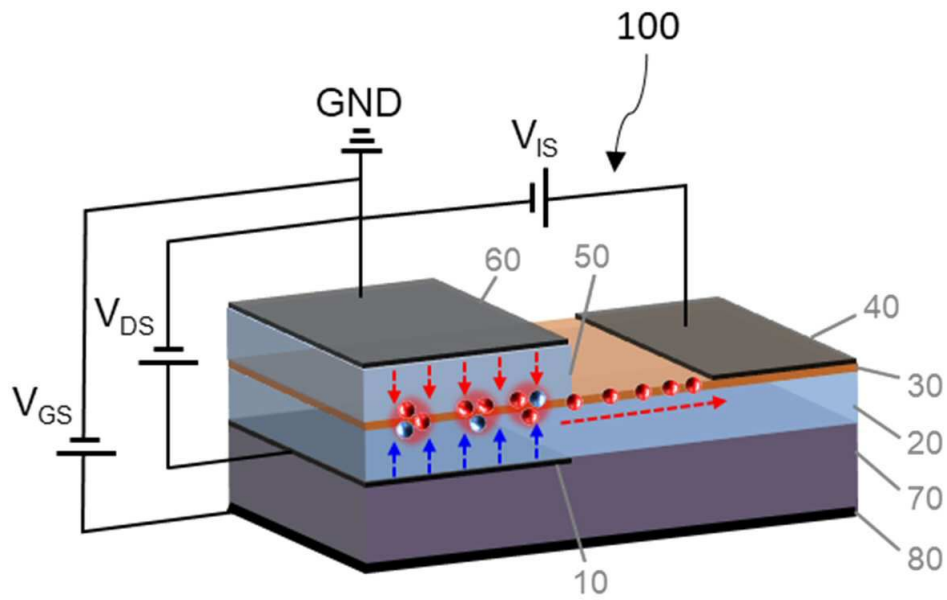
- [0060] 도 4a를 참조하면, 제어 전극(80)에 인가되는 전압( $V_{GS}$ )이 -80 V로부터 +80V로 변화하는 동안 트라이온에 의한 발광이 증가하고, 엑시톤에 의한 발광이 감소하는 것을 확인할 수 있다. 이것은 제어 전극(80)에 인가되는 전압( $V_{GS}$ )가 -80 V로부터 +80V로 변화함에 따라, TMD 층(30)의 확장부로부터 발광부에 공급되는 음전하의 양이 증가하며, 이에 따라 TMD 층(30)의 발광부 내의 전자 밀도가 높아지기 때문이다.
- [0061] 도 4b를 참조하면, 전압( $V_{GS}$ )가 -80 V로부터 +80V로 변화함에 따라, 엑시톤에 의한 발광의 강도( $I_x$ )가 감소하는 반면, 트라이온에 의한 발광의 강도( $I_{x-}$ )가 증가하며, 엑시톤에 의한 발광의 강도( $I_x$ )에 대한 트라이온에 의한 발광의 강도( $I_{x-}$ )의 비율이 증가함을 확인할 수 있다. 이와 같이, 본 발명에서는 제어 전극(80)에 인가되는 전압( $V_{GS}$ )을 조정함으로써 TMD 층(30)의 엑시톤 및 트라이온에 의한 발광 비율을 제어할 수 있고, 이에 따라 발광 파장 및 발광 강도를 변화시킬 수 있다.
- [0063] 본 발명의 일 실시예에 따른 발광 소자(100)는 그래핀, 전이금속 디칼코제나이드 및 hBN과 같은 2차원 물질에 의한 헤테로 적층 구조를 포함하기 때문에, 2차원 물질 이외의 적층 구조를 포함하는 종래 기술의 발광 소자 보다 더 빠른 발광 속도를 갖는다. 또한, 그래핀, 전이금속 디칼코제나이드 및 hBN 은 모두 투명하고 가요성을 갖는 재료이기 때문에, 이러한 재료로 구성되는 발광 소자(100)는 투명하고 가요성이 요구되는 발광 소자로서 다양한 응용 분야, 예를 들면 스마트 글라스 등의 차세대 웨어러블 기기에 적용할 수 있다. 또한, 웨어러블 기기의 경우, 매우 가까운 초점거리에서도 선명한 디스플레이가 요구되며, TV 및 노트북과 달리 눈과 직접 맞닿아 있는 화면의 구성이 필수 요소가 된다. 따라서 미세 패터닝이 가능한 2차원 물질로 구성된 발광 소자는 이러한 차세대 웨어러블 기기에 최적화된 소자로서 활용도가 매우 높다.
- [0065] 도 5는 본 발명의 실시예에 따른 발광 소자(100)의 제조 방법을 나타내는 흐름도이다.
- [0066] 도 5를 참조하면, 발광 소자(100)의 제조 방법은, 기판(70) 상에 양전하 주입 층(10)을 형성하는 단계(S510)와, 양전하 주입층(10) 상에 제 1 절연 층(20)을 형성하는 단계(S520)와, 제 1 절연 층(20) 상에 전이금속 디칼코제나이드(Transition Metal Dichalcogenide; TMD) 층(30)을 형성하는 단계(S530)와, TMD 층(30) 상에 제 2 절연 층(50)을 형성하는 단계(S540)와, 제 2 절연 층(50) 상에 음전하 주입 층(60)을 형성하는 단계(S550)와, TMD 층(30)에 음전하를 공급하기 위해 TMD 층(30)의 적어도 일부에 접하는 음전하 공급 층(40)을 형성하는 단계를 포함할 수 있다.
- [0067] 또한, TMD 층을 형성하는 단계(S530)는, 양자 우물 구조를 구성하며 양전하와 음전하의 재결합(recombination)에 의해 발광하는 발광부와, 상기 발광부로부터 연장된 확장부를 형성하는 단계를 포함할 수 있고, 음전하 공급 층을 형성하는 단계(S560)에서는, TMD 층(30)의 확장부에 접하도록 음전하 공급 층(40)이 형성될 수 있다.
- [0068] 또한, 발광 소자(100)의 제조 방법은, 전계에 의해 TMD 층(30)의 확장부로부터 발광부로 공급되는 음전하의 양을 제어하기 위한 제어 전극(80)을 형성하는 단계와, 제어 전극(80)과 TMD 층(30) 사이에 제 3 절연 층을 형성하는 단계를 더 포함할 수 있다.
- [0069] 발광 소자(100)의 제조 방법에 대한 상기 각 단계의 선후 관계는 도 5에 도시된 순서에 한정되는 것이 아니고, 본 발명에 따른 발광 소자를 제조할 수 있는 이하의 순서의 단계들 모두가 본 발명의 발광 소자의 제조 방법에 포함된다.
- [0071] 이상에서 설명한 본 발명이 전술한 실시예 및 첨부된 도면에 한정되지 않으며, 본 발명의 기술적 사상을 벗어나지 않는 범위 내에서 여러가지 치환, 변형 및 변경이 가능하다는 것은, 본 발명이 속하는 기술분야에서 통상의 지식을 가진 자에게 있어 명백할 것이다.

도면

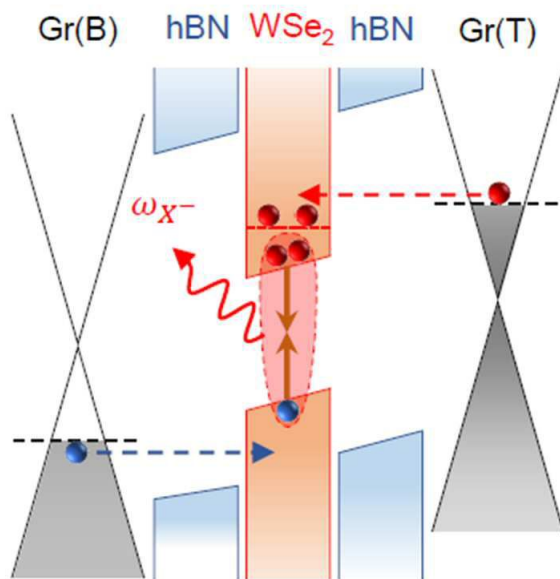
도면1a



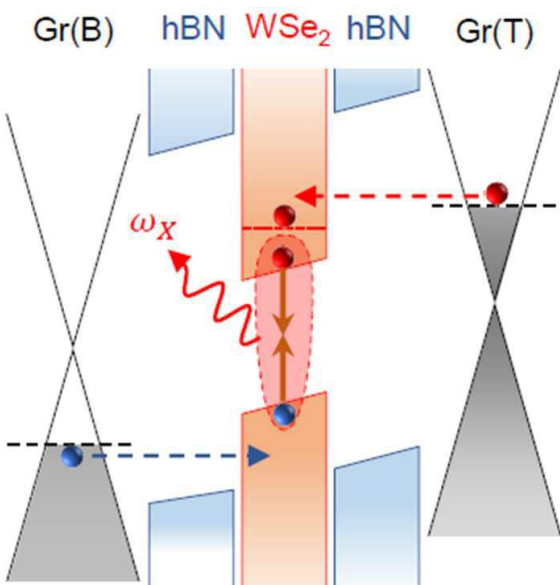
도면1b



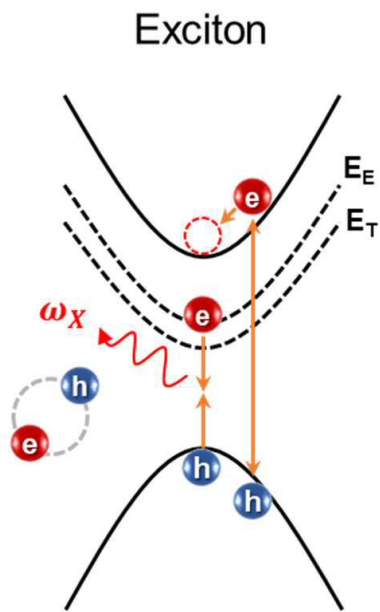
도면1c



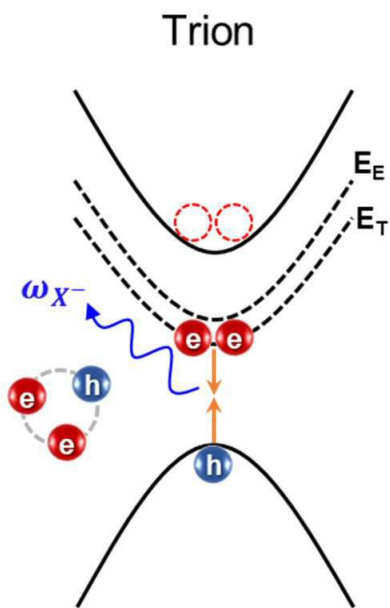
도면1d



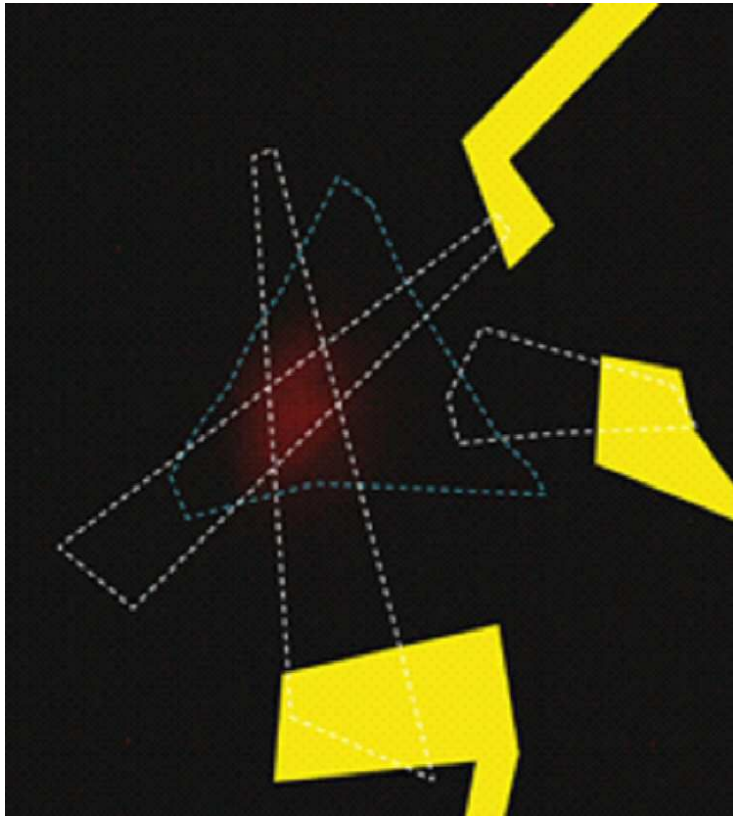
도면2a



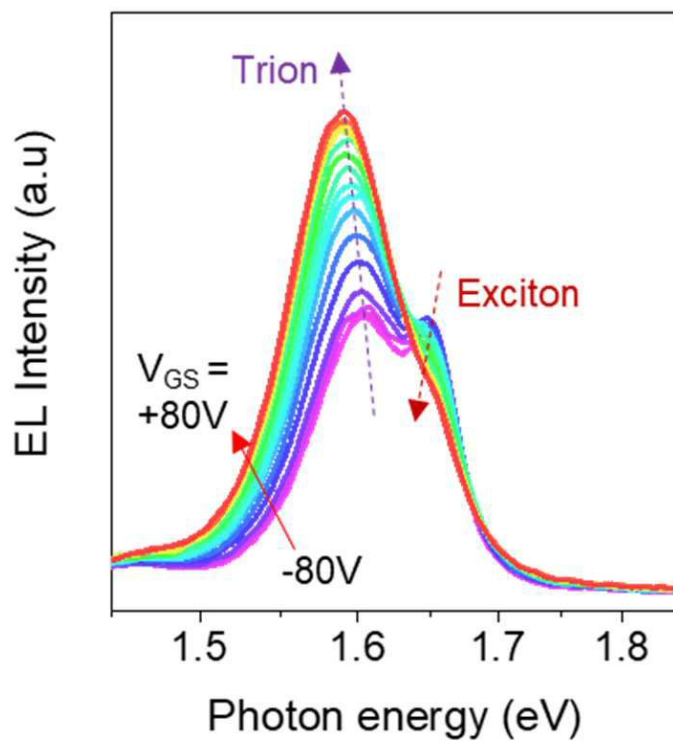
도면2b



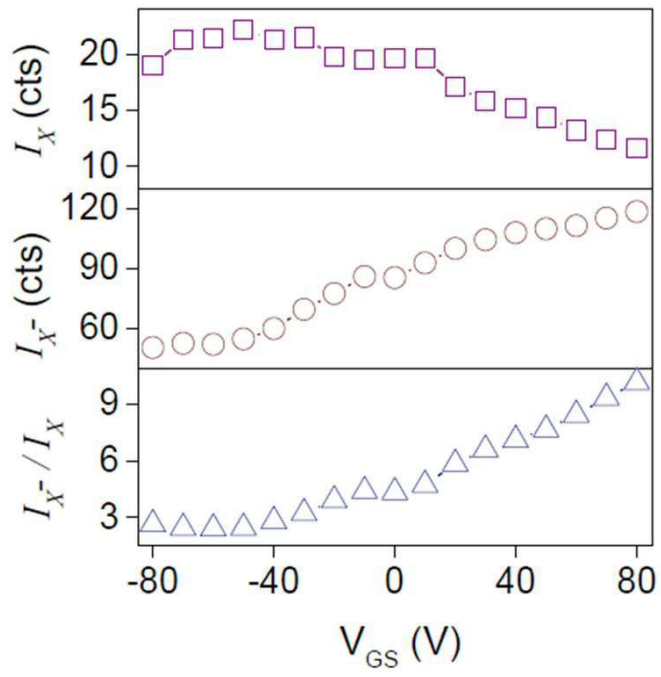
도면3



도면4a



도면4b



도면5

