

# SnS<sub>2</sub>/p-Si 이종접합 광 검출기

## SnS<sub>2</sub>/p-Si Heterojunction Photodetector

오 창 균\* · 차 윤 미\* · 이 경 남\*\* · 정 복 만\* · 김 준 동\*\*\*,†

(Chang-Gyun Oh · Yun-Mi Cha · Gyeong-Nam Lee · Bok-Mahn Jung · Joondong Kim)

**Abstract** : A heterojunction SnS<sub>2</sub>/p-Si photodetector was fabricated by RF magnetron sputtering system. SnS<sub>2</sub> was formed with 2-inch SnS<sub>2</sub> target. Al was applied as the front and the back metal contacts. Rapid thermal process was conducted at 500 °C to enhance the contact quality. 2D material such as SnS<sub>2</sub>, MoS<sub>2</sub> is very attractive in various fields such as field effect transistors (FET), photovoltaic fields such as photovoltaic devices, optical sensors and gas sensors. 2D material can play a significant role in the development of high performance sensors, especially due to the advantages of large surface area, nanoscale thickness and easy surface treatment. Especially, SnS<sub>2</sub> has a indirect bandgap in the single and bulk states and its value is 2 eV-2.6 eV which is considerably larger than that of the other 2D material. The large bandgap of SnS<sub>2</sub> offers the advantage for the large on-off current ratio and low leakage current. The SnS<sub>2</sub>/p-Si photodetector clearly shows the current rectification when the thickness of SnS<sub>2</sub> is 80 nm compared to when it is 135 nm. The highest photocurrent is 19.73 μA at the wavelength of 740 nm with SnS<sub>2</sub> thickness of 80 nm. The combination of 2D materials with Si may enhance the Si photoelectric device performance with controlling the thickness of 2D layer.

**Key Words** : SnS<sub>2</sub>, Photodetector, Photoresponse, p-Si, 2D material

### 1. 서 론

2004년 Graphene 발견되면서 Transition metal disulfide (TMD)와 같은 2D 구조의 층을 이루는 물질에 대한 관심이 커지고 있다. TMD 물질들은 인접한 층이 평면 공유 결합하는 특이한 구조를 가지는데 이는 Van der waals 힘에 의해 독특한 구조를 형성한다[1,2]. TMD 물질의 구조는 Field effect transistors (FET), Photovoltaic devices와 같은 광전기 분야, 광 센서, 가스 센서 등 여러 분야에서 큰 매력을 가지고 있다. TMD 물질은 넓은 표면적, 나노 스케일의 두께 형성, 쉬운 표면처리 등의 이점으로 인해 특히 고성능의 센서 개발에 큰 역할을 할 수 있다. 이는 기존의 금속 산화물과 비교하여 큰 이점을 지닌다[3-5]. 현재까지 보고된 금속 산화물은 일반적으로 전자 전도도가 낮은 특성을 가지는데, TMD 물질은 금속-황의 공유 결합 특성으로 인해 더 높은 고유 전자 전도도를 가진다. 대표적인 TMD 물질로는 MoS<sub>2</sub>, VS<sub>2</sub>, WS<sub>2</sub>, SnS<sub>2</sub> 등이 있고 이 물질들은 금속 산화물과 비교하여 개선되어 전기 화학적 특성을 위해 제안되어 왔다[6].

SnS<sub>2</sub>는 단층 및 벌크 결정 상태에서 모두 indirect bandgap을 가지고 있는데 일반적으로 2 eV-2.6 eV의 범위의 값을 가진다. SnS<sub>2</sub>는 가장 많이 사용되는 TMD 물질 중 하나인 MoS<sub>2</sub>와 비교하여 상당히 큰 에너지 밴드 갭을 가진다. SnS<sub>2</sub>의 큰 밴드 갭은 큰 온-오프 전류의 비율 그리고 낮은 누설 전류를 가지게 하는 이점을 제공한다[7]. 또한 다른 TMD 물질보다 소자가 더 큰 전압, 주파수 그리고 더 높은 온도에서도 작동 할 수 있도록 하는 장점이 있다. SnS<sub>2</sub>의 넓은 밴드갭과 이루는 층 구조의 관계는 아직 명확하지 않은 상태이다[8-10]. SnS<sub>2</sub>는 FET에서 널리 연구된 MoS<sub>2</sub>보다 우수한 성능을 보였으며, water splitting, 광 및 가스 센스, 배터리 등의 분야에서 활발히 연구가 진행중이다[11,12].

본 연구에서는 TMD 물질인 SnS<sub>2</sub>와 p-type Si의 heterojunction를 형성하고 소자의 광 센서로서 광학, 전기적 특성을 분석하였다.

### 2. 실험과정

본 실험에서는 P-type Si 기판을 사용했으며, 실험 진행에 앞서 ultrasonic cleaner를 사용하여 아세톤, 메탄올, 증류수 순으로 각 10분씩 세정 작업을 진행한 후, nitrogen blowing을 이용하여 건조 작업을 하였다. 본 실험의 공정 순서는 Fig. 1에 도식화했다. P-type Si 위 Room Temperature에서 SnS<sub>2</sub>를 증착하였다. 증착된 SnS<sub>2</sub>는 순도 99.9% target을 이용하여 스퍼터링(magnetron sputtering) 공정으로 증착되었다. RF 50W에 증착시간은 각각 10분과 20분으로 두 가지 샘플을 제작하였다. 후면 전극은 Al을 사용하였으며 전면 전극은 Al을 grid의 형태로 공정을 진행하였다.

† Corresponding Author : Department of Electrical Engineering, Incheon National University, Incheon 22012, Korea  
E-mail: joonkim@incheon.ac.kr

\* Department of Electrical Engineering, Incheon National University, Korea

\*\* Photoelectric and Energy Device Application Lab, Multi-disciplinary Core Institute for Future Energies, Incheon National University, Korea

Received : July 26, 2018; Accepted : September 18, 2018

최종적으로 RTP를 이용하여 후 열처리를 진행하였고 이는 전극의 접촉 저항을 최소화시키기 위해서이다. 전계 방출형 주사 현미경 (FE-SEM)을 사용하여 SnS<sub>2</sub>의 두께를 확인하였고, UV-vis spectrophotometer (UV-2600, Shimadzu)와 potentiostat/galvanostat (ZIVE SP2, Wona Tech, Korea)를 사용하여 광학, 전기적 특성을 분석하였다.

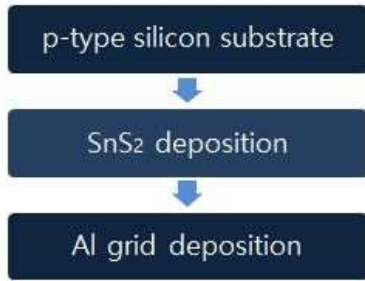


그림 1 Al grid/SnS<sub>2</sub>/p-Si/Al 구조의 이종접합 광 검출기 제작 과정

Fig. 1 Fabrication steps of Al grid/SnS<sub>2</sub>/p-Si/Al photo-detector

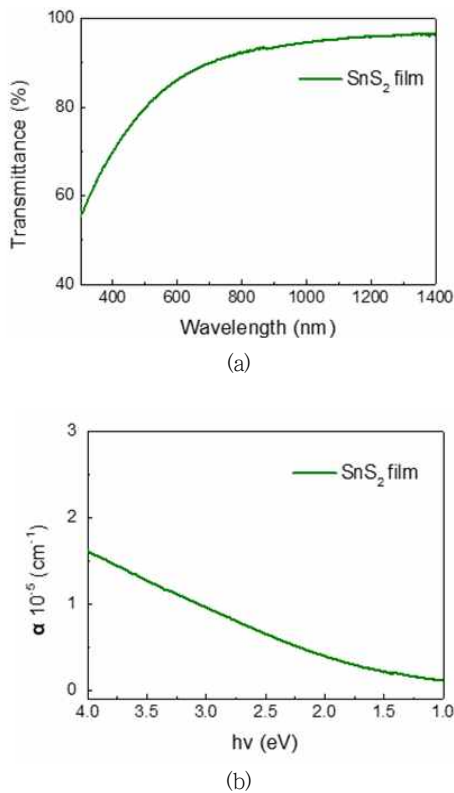
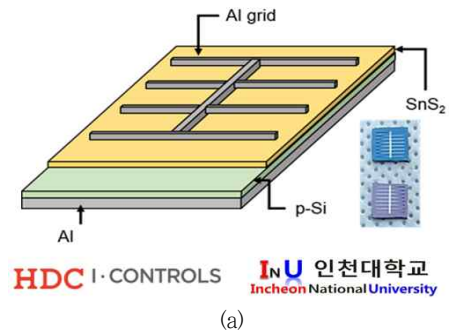
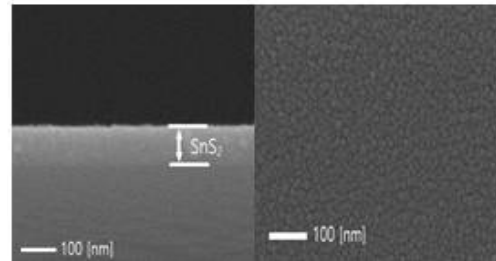


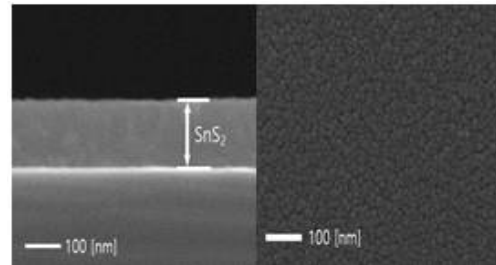
그림 2 (a) SnS<sub>2</sub> 투과율 (b) SnS<sub>2</sub> 흡수계수  $\alpha$   
 Fig. 2 Optical characteristic of SnS<sub>2</sub> film (a) transmittance (b) absorption coefficient



(a)



(b)



(c)

그림 3 (a) Al grid/SnS<sub>2</sub>/p-Si/Al 모식도 그리고 실제사진 (b) 80 nm 두께 SnS<sub>2</sub> 표면 그리고 측면 SEM 이미지 (c) 135 nm 두께 SnS<sub>2</sub> 표면 그리고 측면 SEM 이미지

Fig. 3 (a) schematic and photographic of Al grid/SnS<sub>2</sub>/p-Si/Al (b) SEM image in 80 nm thickness of SnS<sub>2</sub> (c) SEM image in 135 nm thickness of SnS<sub>2</sub>

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 SnS<sub>2</sub> 광학특성

Fig. 2의 (a)는 SnS<sub>2</sub> film에 파장에 따른 투과율을 보여준다. 파장이 커짐에 따라 SnS<sub>2</sub>의 투과율이 커지는 특성을 가지며, 가시광 영역에서 투과도가 80% 이상으로 확보되는 반면 자외선 영역은 효과적으로 차단되고 있음을 볼 수 있다. (b)는 photon energy (hv)에 따른 광 흡수계수  $\alpha$ 를 보여준다. 광 흡수계수  $\alpha$ 는 자외선 영역을 제외한 영역에서 낮은 수치를 보이고 있다. 광 흡수계수  $\alpha$ 는 아래의 식과 같다[13].

$$\alpha = \frac{1}{d} \ln\left(\frac{1}{T}\right), hv = \frac{1240}{\lambda}$$

### 3.2 SEM 분석

Fig. 3(a)는 소자의 구조 모식도와 실제 사진을 나타내었다. Fig. 3의 (b)와 (c)는 SnS<sub>2</sub>/Si 구조의 SEM image로서 각 sample의 두께는 (b) SnS<sub>2</sub>는 80nm, (c) SnS<sub>2</sub>는 135nm의 Si 기판과 hetero junction을 보이고 있다. 샘플의 전면전극과 후면전극은 전도성이 우수한 Al을 사용하였다.

### 3.3 광 검출기 I-V 특성

Fig. 4는 소자의 I-V 특성을 보이고 있다. 두 가지 소자 모두 명확한 정류특성을 보이고 있으며 (a)의 소자는 정방향 바이어스에서 더 큰 전류 수치를 보이고 있다. SnS<sub>2</sub>의 두께가 증가함에 따라 저항이 증가하기 때문에 (b)에서 전류의 수치가 크게 감소함을 알 수 있다. 저항의 크기는 광 전류의 수치에 크게 영향을 주기 때문에 얇은 두께의 SnS<sub>2</sub> 형성이 필수적이다.

### 3.4 UV 광 검출기 광학적, 전기적 특성

Fig. 5의 (a), (b)는 각 광원 파장에 대한 응답률을 나타낸 그

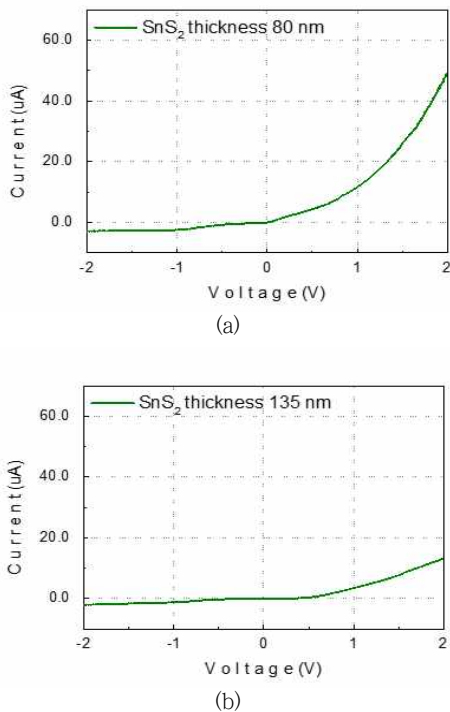


그림 4 SnO<sub>2</sub> 광학적 특성 (a) 투과율 (b) 흡수도 (c) tauc plot  
 Fig. 4 I-V curve of Al grid/SnS<sub>2</sub>/p-Si/Al photodetector (a) 80 nm thickness of SnS<sub>2</sub> (b) 135 nm thickness of SnS<sub>2</sub>

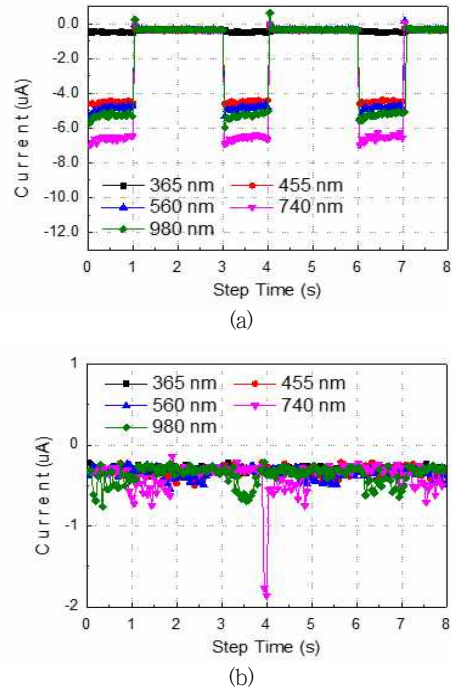


그림 5 Al grid/SnS<sub>2</sub>/p-Si/Al 광 검출기 파장별 광 응답 (a) SnS<sub>2</sub> 두께 80 nm (b) SnS<sub>2</sub> 두께 135 nm  
 Fig. 5 Photoresponse of Al grid/SnS<sub>2</sub>/p-Si/Al photodetector (a) 80 nm thickness of SnS<sub>2</sub> (b) 135 nm thickness of SnS<sub>2</sub>

표 1 광 검출기 광전류 수치

Table 1 Photocurrent of Al grid/SnS<sub>2</sub>/p-Si/Al photodetector

λ	Photocurrent (μA)				
	365nm	455nm	560nm	740nm	980nm
(a)	1.389	13.53	14.62	19.74	15.82
(b)	0.933	1.003	1.069	1.414	1.364

래프이다. 광원을 on-off를 반복하여 광 응답을 측정하였다. 아래의 Table 1에는 파장에 따른 광전류 수치를 표기하였다. (a)의 광 응답은 740 nm에서 19.74 μA로 가장 높은 광전류를 보여주며 365 nm에서 1.389 μA로 가장 낮은 광전류 값을 보여주었다. (b)의 광 응답은 365 nm에서 0.933 μA로 가장 낮은 광전류 값을 보였고 740 nm에서 1.414 μA로 가장 큰 값을 보여주었다. (b)에서 광 응답 수치는 SnS<sub>2</sub> 두께 증가로 인한 저항 증가와 광 흡수층인 p-type Si까지의 광 투과율이 감소하면서 광 응답의 수치가 감소함을 알 수 있다.

$$Photo-response\ ratio = \frac{I_{light\_on}}{I_{light\_off}}$$

광 응답비는 위 수식을 이용해 구할 수 있으며 (a)의 photo-

response ratio는 740 nm 파장에서 2005 %이고, (b)의 photo-response ratio는 740 nm 파장에서 149 %으로 (a)에 비해 현저히 낮은 값을 나타냈다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 스퍼터링 증착과정을 이용한 SnS<sub>2</sub>의 광학특성을 분석하고 p-Si 기판위에 SnS<sub>2</sub>의 스퍼터링 공정 시간을 다르게 하여 달라지는 증착 두께에 따른 특성을 비교 분석하였다.

Band-gap이 큰 편에 속하는 SnS<sub>2</sub>는 우수한 광 센서의 재료로서 좋은 특성을 가지며 스퍼터링 공법으로 쉽게 증착이 가능하고 고품질의 결정을 만들 수 있다. 스퍼터링 공정을 80 nm의 두께로 SnS<sub>2</sub>를 증착한 소자의 I-V curve는 135 nm의 두께로 증착된 SnS<sub>2</sub> 소자의 I-V curve보다 전류량에서 훨씬 많은 이득이 있음을 알 수 있다. 각 파장에 따른 광전류도 확연하게 차이를 보이는데 두께에 따른 저항의 증가와 빛의 투과율 감소로 분석되었다. 따라서 고성능의 광 센서 제작을 위해 얇은 두께의 SnS<sub>2</sub> 층의 형성이 필수적이다. 이번 연구는 SnS<sub>2</sub>와 p-Si간 hetero-junction을 이용한 광전소자의 제작과 두께의 차이에 따른 성능 비교에 목적이 있다. 이는 향후 SnS<sub>2</sub> 기반의 여러 광전소자 개발에 중요한 역할을 할 것이다.

#### 감사의 글

The authors acknowledge the financial support of Precedent Research Program by HDC-ICONTROLS. C.G. Oh, Y. M. Cha, G. N. Lee equally contributed to this work.

#### References

- [1] Chen, H. et al. "Suspended SnS<sub>2</sub> Layers by Light Assistance for Ultrasensitive Ammonia Detection at Room Temperature", *Adv. Funct. Mater.* Vol. 28, pp. 1-8, 2018.
- [2] Geim, A. K. and Grigorieva, I. V. Van der Waals heterostructures. *Nature*, Vol. 499, pp. 419-425, 2013.
- [3] Fiori, G. et al. "Electronics based on two-dimensional materials," *Nat. Nanotechnol.*, Vol. 9, pp. 768-779, 2014.
- [4] Yang, W., Gan, L., Li, H. and Zhai, T., "Two-dimensional layered nanomaterials for gas-sensing applications," *Inorg. Chem. Front.*, Vol. 3, pp. 433-451, 2016.
- [5] Zhou, X. et al. "Tunneling Diode Based on WSe<sub>2</sub>/SnS<sub>2</sub> Hetero structure Incorporating High Detectivity and Responsivity," *Adv. Mater.*, Vol. 30, pp. 1703286-1703294, 2018.
- [6] Li, X. et al. "SnS<sub>2</sub>/TiO<sub>2</sub> Nano hybrids Chemically Bonded on Nitrogen-doped Graphene for Lithium-Sulfur Batteries: Synergy of Vacancy Defects and Heterostructure", *Nanoscale*, 2013.
- [7] Nørby, P., Johnsen, S. and Iversen, B. B. "Fine tunable aqueous solution synthesis of textured flexible SnS<sub>2</sub> thin films and nanosheets", *Phys. Chem. Chem. Phys.*, Vol. 17, pp. 9282-9287, 2015.
- [8] He, X. and Shen, H. "Ab initio calculations of band structure and thermophysical properties for SnS<sub>2</sub> and SnSe<sub>2</sub>", *Phys. B Condens. Matter*, Vol. 407, pp. 1146-1152, 2012.
- [9] Liu, Z., Deng, H. and Mukherjee, P. P. "Evaluating pristine and modified SnS<sub>2</sub> as a lithium-ion battery anode: A first-principles study", *ACS Appl. Mater. Interfaces*, Vol. 7, pp. 4000-4009, 2015.
- [10] Ye, G. et al. "Synthesis of large-scale atomic-layer SnS<sub>2</sub> through chemical vapor deposition", *Nano Res.*, Vol. 10, pp. 2386-2394, 2017.
- [11] Huang, Y. et al. "Tin disulfide-an emerging layered metal dichalcogenide semiconductor: Materials properties and device characteristics", *ACS Nano*, Vol. 8, pp. 10743-10755 2014.
- [12] Mattinen, M. et al. "Low-Temperature Wafer-Scale Deposition of Continuous 2D SnS<sub>2</sub> Films. Small, Accept", *Publ.*, Vol. 1800547, pp. 1-8, 2018.
- [13] Liu, J. W., et al. "Photoassisted degradation of pentachlorophenol in a simulated soil washing system containing nonionic surfactant Triton X-100 with La-B codoped TiO<sub>2</sub> under visible and solar light irradiation", *Applied Catalysis B: Environmental*, Vol. 103, pp. 470-478, 2011.

#### 저 자 소 개



#### 오 창 균 (Chang-Gyun Oh)

1993년 4월 24일생

현재 인천대학교 전기공학과 재학

E-mail : sykim2023@naver.com



**차 윤 미 (Yun-Mi Cha)**

1996년 9월 24일생 2015년~현재 인천대학교 전기공학과 재학

E-mail : yyyymxd@naver.com



**이 경 남 (Gyeong-Nam Lee)**

1991년 8월 7일생. 2017년 인천대학교 전기공학과 졸업. 2017년~현재 동 대학원 전기공학과 석사과정

E-mail : rudska8741@gmail.com



**정 복 만 (Bok-Mahn Jung)**

1972년 1월 20일생. 1999년 광운대학교 전기공학과 (학사), 2017년 인천대학교 전기공학과 (석사), 2006년~현재 인천대학교 재직, 건축전기설비기술사, 한국환경공단 기술자문위원

E-mail : marinq@inu.ac.kr



**김 준 동 (Joondong Kim)**

2006년 University at Buffalo, The State University of New York (박사), 2001년 Rensselaer Polytechnic institute (석사), 1999년 광운대학교 (학사). 2013년~현재 인천대학교 전기공학과 교수, 2012년~2013년 군산대학교 전기공학과 교수, 2006년~2012년 한국기계연구원, 선임연구원

E-mail : joonkim@incheon.ac.kr