

Bi₂Te₃, Sb₂Te₃, 및 Bi_{0.5}Sb_{1.5}Te₃ 플레이크들의 광학 및 광전자적 특성

조현승¹ · 김주원¹ · 김상일^{2,*} · 김태완^{1,*}

¹전북대학교 전기공학과
²서울시립대학교 신소재공학과

Optical and Optoelectronic Properties of Bi₂Te₃, Sb₂Te₃, and Bi_{0.5}Sb_{1.5}Te₃ Flakes

Hyeun Seung Jo¹, Ju Won Kim¹, Sang-il Kim^{2,*}, and TaeWan Kim^{1,*}

¹Department of Electrical Engineering and Smart Grid Research Center, Jeonbuk National University, Jeonju 54896, Republic of Korea

²Department of Materials Science and Engineering, University of Seoul, Seoul 02504, Republic of Korea

Abstract: In this study, a mechanical exfoliation method was developed for the synthesis of high purity Bi₂Te₃, Sb₂Te₃, and Bi_{0.5}Sb_{1.5}Te₃ flakes. The synthesized Bi₂Te₃, Sb₂Te₃, and Bi_{0.5}Sb_{1.5}Te₃ flakes were characterized by atomic force microscope, Raman spectroscopy, and photoluminescence (PL). The effect of the thickness of the Bi₂Te₃, Sb₂Te₃, and Bi_{0.5}Sb_{1.5}Te₃ flakes on PL and Raman spectra was investigated. As the thickness increased in the Bi₂Te₃ flakes, the out of plane vibration mode (A_{1g}^2) shows a blue shift. For the thicker Sb₂Te₃ flakes, the A_{1g}^1 and E_g^2 modes indicated a blue shift and a red shift, respectively. When the thickness of Bi_{0.5}Sb_{1.5}Te₃ flakes decreased, the in-plane vibration mode (E_g^2) shifted to lower frequencies. A new Raman peak has been observed in Bi_{0.5}Sb_{1.5}Te₃ flakes, which is not active in the thin films. PL measurements of Bi_{0.5}Sb_{1.5}Te₃ flakes with various thickness revealed PL peaks in the range of 2.15 - 2.54 eV at room temperature (300 K). A Bi_{0.5}Sb_{1.5}Te₃ flakes-based photodetector exhibited photoresponsivity as high as 661.5 A/W at a 0.02 mW power density with an 1800 nm laser at room temperature (300 K). Compared to the optoelectronic properties of Bi₂Te₃ flake, a twice higher responsivity at a wavelength of 1800 nm was observed with the Bi_{0.5}Sb_{1.5}Te₃ flake-based photodetector.

(Received 30 October, 2022; Accepted 28 November, 2022)

Keywords: Bi₂Te₃, Bi_{0.5}Sb_{1.5}Te₃, raman spectroscopy, optoelectric properties, photocurrent

1. 서 론

Bi₂Te₃, Sb₂Te₃ 그리고 그와 관련된 화합물들은 에너지 갭과 디랙 원뿔 (Dirac cone)로 구성된 갭이 없는 표면 상태를 가진 대표적인 위상적 절연체 (Topological Insulator, TI) 소재이다 [1,2]. 양자 홀 효과는 외부 자기장에 의해 발생되는데 TI 소재들은 자기장이 없는 상황에서 스핀-궤도 결합 현상을 통해 양자 홀 효과를 보이는 것으로 나

타났다 [3,4]. 금속성 표면 준위에 대한 연구와 그 표면을 따라 존재하는 스핀에 기반한 연구가 기존에 많이 사용되어 왔던 Si 기반 소자를 대체하는 차세대 고성능 전계효과 트랜지스터 (field effect transistor)의 개발이 끊임없이 이루어지고 있다 [5]. 또한, 양자적 컴퓨팅 연구와 3-Dimension 절연체 연구, 더 나아가 스핀 전류를 통한 메모리 관련 연구도 활발하다 [4,5]. TI로서의 새로운 역할 외에도 Bi₂Te₃ 및 관련 재료는 상온 응용에 가장 널리 사용되는 열전 재료 중 하나다 [6-9]. 더불어 나노 단위의 소자가 발전됨에 따른 복잡한 열전재료들의 열 전력 개선과 열 전도성을 줄이는 방법도 연구가 활발히 진행되고 있다 [6-8]. 광전자 소자 측면에서 TI 소재들은 매우 낮은 에너지 밴드갭을 갖고 있어 기존의 Si 혹은 3-5족 반도체

- 김태완 · 김상일: 교수, 조현승 · 김주원: 석사과정

*Corresponding Author: TaeWan Kim

[Tel: +82-63-270-2559, E-mail: twkim@jbnu.ac.kr]

*Corresponding Author:

[Tel: +82-, E-mail: sang1.kim@uos.ac.kr]

Copyright © The Korean Institute of Metals and Materials

기반 (GaAs, InGaAs 등)의 광 검출기(Photodetector)보다 더욱 넓은 범위의 광 검출 범위를 갖는 장점에 대한 연구도 진행되어왔다 [10,15].

TI 소재들은 대부분 5개의 원자면이 공유결합한 5중층 (Quintuple layer)의 이방성 구조를 가지고 있다. 각각의 5중층은 약 1 nm의 두께를 가지며, 이들 원자 층 사이는 반데르발스힘에 의해 약하게 연결되어 있어 쉽게 박리할 수 있다 [11,12]. 우리는 용융-응고(melt-solidification) 공정법을 이용하여 벌크 (bulk) Bi_2Te_3 , Sb_2Te_3 , $\text{Bi}_{0.5}\text{Sb}_{1.5}\text{Te}_3$ 들을 합성하였으며, 이를 기계적 박리법으로 TI 플레이크 (flake) 소재를 제조하였다. TI 플레이크 소재들의 광학적 특성을 라만 분광법과 광발광 측정법을 사용하여 체계적으로 분석하였다. 또한, Bi_2Te_3 , $\text{Bi}_{0.5}\text{Sb}_{1.5}\text{Te}_3$ 플레이크들 (flakes)의 자외선 (ultraviolet) - 가시광 (visible) - 적외선 영역 (infrared)의 파장 변화에 따른 광 반응도 (Photoresponsivity) 측정을 통해 TI 소재로서 Bi_2Te_3 그리고 그와 관련된 화합물의 광 검출기 (Photodetector) 응용 가능성의 잠재력을 확인할 수 있었다.

2. 실험 방법

벌크 Bi_2Te_3 , Sb_2Te_3 그리고 $\text{Bi}_{0.5}\text{Sb}_{1.5}\text{Te}_3$ 는 표준공정인 용융-응고(melt-solidification) 공정을 적용하여 원료 잉곳을 합성하는 방법으로 진행했다. Shot 형태의 고순도 Bi, Sb, Te (5N Plus, 99,999 %)를 각 샘플의 조성비에 맞게 칭량하였다. 그 다음 석영관 (직경 15 mm)에 넣고 진공($\sim 10^{-4}$ torr) 상태가 유지될 수 있도록 봉합하였다. 1150°C 에서 10시간 동안 용융 시킨 후, 상온 냉각하여 잉곳 형태의 원

료 소재를 제조하였다. 제조된 잉곳 중 너비 수 mm 이상의 결정 부분을 수득하여 Scotch 테이프로 박리하여, $90 \sim 485$ nm 두께의 플레이크를 수득하였다. 상형성 분석을 위해 제조된 화합물은 분말화 하여 X선 회절(X-Ray Diffraction: XRD, D8 Discover, Bruker) 분석을 진행하였으며, 각 화합물의 격자상수를 산출하였다.

Bi_2Te_3 , Sb_2Te_3 그리고 그와 관련된 화합물들은 원자 층 - 원자 층 사이에 반데르발스힘에 의해 약하게 결합되어 있다. 우리는 Bi_2Te_3 및 관련 물질 (Sb_2Te_3 , $\text{Bi}_x\text{Sb}_{2-x}\text{Te}_3$)의 FQL (Few quintuple layer) 플레이크를 기계적 박리법을 사용하여 벌크 샘플에서 분리하여 SiO_2/Si 기판에 전사하였다. 전사된 Bi_2Te_3 , Sb_2Te_3 , $\text{Bi}_{0.5}\text{Sb}_{1.5}\text{Te}_3$ 플레이크들은 각각 광학 현미경 (Optical microscope) 및 원자 힘 현미경 (Atomic force microscope: AFM)을 통해 시료의 표면 형태 및 두께를 확인하였다. 그 후 시료의 광학적 특성을 파악하기 위해 나노 종합 기술원 (National NanoFAB Center, NNFC)의 라만 분광 분석기 (FEX, NOST)를 통해 라만 스펙트럼 및 광 발광을 분석하였다. 라만 측정 시 레이저의 파장 및 세기는 각각 532 nm, 2.878 mW를 사용하였고 광 발광 측정 시 레이저 파장은 405 nm를 사용하였으며, 실험은 상온에서 진행되었다. Bi_2Te_3 및 $\text{Bi}_{0.5}\text{Sb}_{1.5}\text{Te}_3$ 기반 광 검출기 소자 제작을 위해 박리된 플레이크 위에 $50 \mu\text{m}$ 의 구리선을 올려 채널을 형성하였다. 그리고 구리선으로 덮이지 않는 부분에 E-beam evaporator를 통해 Ti/Au ($5/50$ nm)를 source/drain 전극으로 증착하였다. 광 반응도 측정은 파라미터 분석기(4200, Keithley Inc.)가 장착되어 있는 4단자 프로브스테이션 (M6VC, MS-tech)을 이용해 진공상태 (10^{-3} Torr)에서 측정되었다.

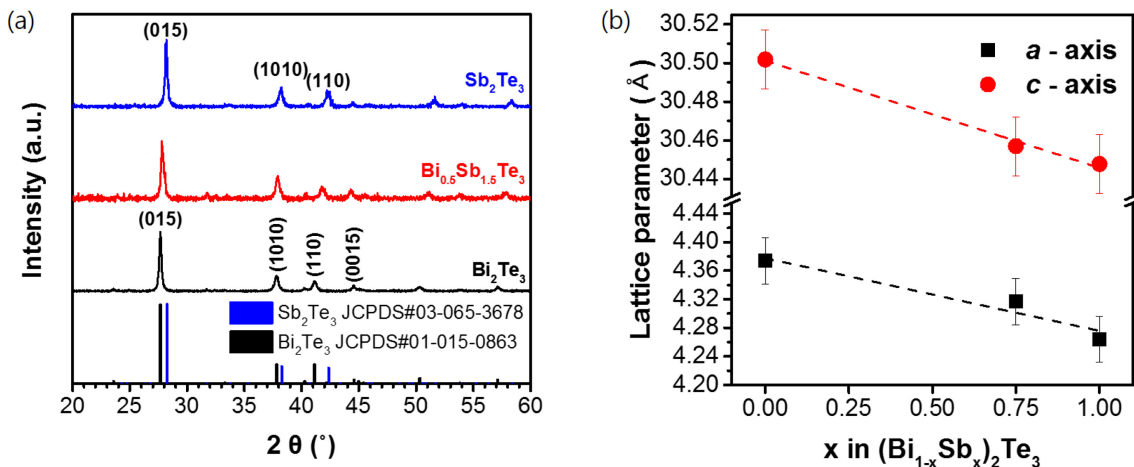


Fig. 1. X-ray diffraction patterns of (a) Bi_2Te_3 , Sb_2Te_3 , and $\text{Bi}_{0.5}\text{Sb}_{1.5}\text{Te}_3$ flakes. (b) Calculated lattice parameters a and c of $\text{Bi}_x\text{Sb}_{2-x}\text{Te}_3$ ($x = 0, 0.5, 2$).

전원 공급 장치(OPS-A500, Newport)로 전원을 공급하였고, 광원으로는 단색화 장치(CS130, Newport)를 사용하였다. 이후 광 출력 밀도를 측정하기 위해서 파워 미터(1963-R, Newport), Si 광 검출기(10UVSI, ICC), Ge 광 검출기(71SI00422, Newport)를 사용하였고 이를 토대로 광 반응도를 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

그림 1(a), (b)은 본 연구에서 합성한 $\text{Bi}_x\text{Sb}_{2-x}\text{Te}_3$ ($x = 0, 0.5, 2$) 소결체의 XRD 분석 결과를 나타낸다. Bi와 Sb의 조성비를 변경한 샘플들 전체의 XRD 패턴을 순수 Bi_2Sb_3 및 Sb_2Te_3 의 XRD 패턴(#03-065-3678, #01-015-0863)과 비교해 보았을 때 단일상을 형성하였음을 확인하였다. 그림 1(b)에 XRD 패턴으로부터 계산한 격자상수 변화를 보면 Sb의 조성이 $x=0$ 에서 $x=2$ 로 증가함에 따라 a 축, c 축 모두 감소하였다. 이는 Bi^{3+} 의 이온반경(117 pm)이 Sb^{3+} 의 이온반경(90 pm)보다 크기 때문이다.

Bi_2Te_3 계 물질들은 5개의 원자 평면이 공유 결합되어 5중 층(quintuple layers)을 형성하는 이방성 층 구성으로 잘 알려져 있다 [11]. 그림 2(a)는 Bi_2Te_3 플레이크의 광학 현미경의 사진을 보여주고 있으며 두께 단차를 갖는 플레

이크를 박리 후 SiO_2/Si 기판에 전사된 형태를 나타내고 있다. 그림 2(b)에서는 AFM 사진과 두께 단차를 측정된 결과를 보여주고 있으며, 각각의 위치별로 168 nm, 241 nm, 485 nm의 두께를 갖는 것으로 확인되었다. Bi_2Te_3 플레이크의 두께에 따른 라만과 광발광에 대한 측정이 진행되었고, 이에 대한 측정 결과가 그림 2(c)와 2(d)에 나타나고 있다. 두께가 다른 모든 Bi_2Te_3 플레이크에서 61.26 cm^{-1} (A_{1g}^1), 101.12 cm^{-1} (E_g^2), 그리고 133.03 cm^{-1} (A_{1g}^2)에서 라만 봉우리가 나타남을 확인할 수 있었다 (그림 2(c), 표 1). A_{1g}^1 와 A_{1g}^2 는 각각 Bi와 Te 원자가 각 원자층에 수직인 방향(out of plane)으로 서로 같은 방향과 반대 방향으로 진동하는 모드이고, E_g^2 모드는 Bi와 Te 원자가 각 원자층에 평면상(in-plane)에서 서로 반대 방향으로 진동하는 모드이다. [16] 두께의 변화에 따른 A_{1g}^1 , E_g^2 의 봉우리 위치는 큰 변화가 없었지만, A_{1g}^2 봉우리는 두께가 두꺼워질수록 청색 이동 (blue shift) 현상 일어나는 것을 발견하였다. 또한, 두께 변화에 따른 라만 봉우리의 세기는 거의 변화가 없었다. 플레이크 두께 별 광발광 실험의 결과에서는 상대적으로 두꺼운 241 nm 두께에서 광발광 반응이 없는 반면, 얇을 때(~168 nm)에는 498.92 nm의 파장에서 광발광 봉우리가 발견되었고, 이는 약 2.48 eV의 에너지 갖는 것을 확인할 수 있었다. 이는 기존 연구 결과인

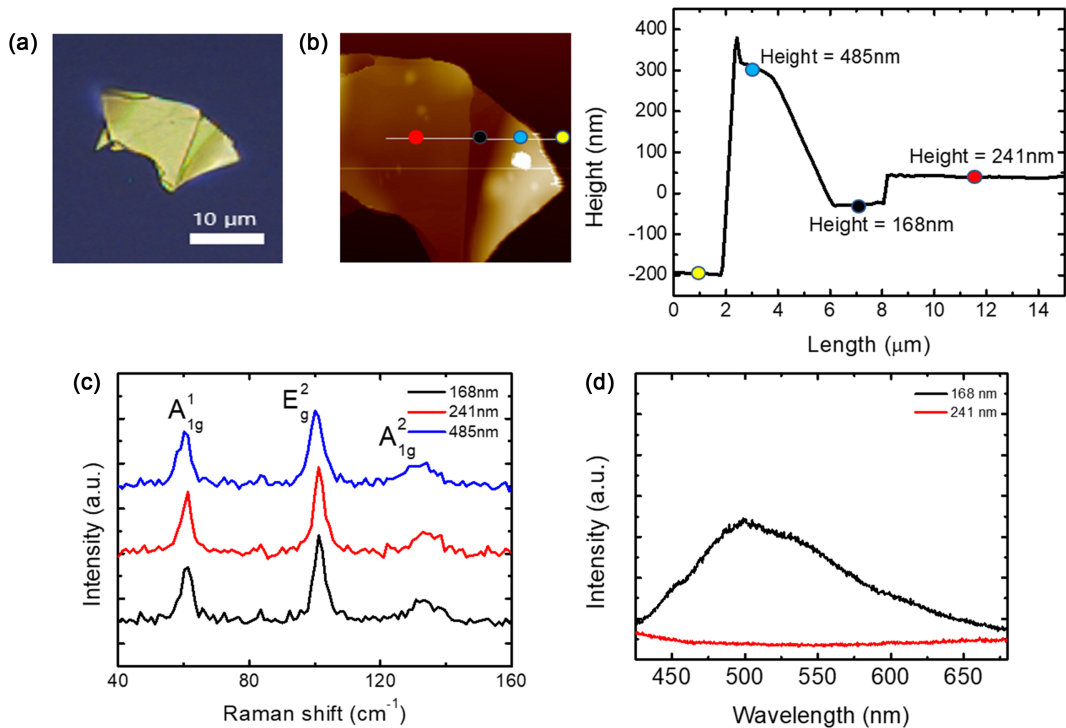


Fig. 2. (a) Optical microscope image of exfoliated Bi_2Te_3 . (b) AFM image of Bi_2Te_3 and thickness profile. (c) Raman spectrums of Bi_2Te_3 on Si/SiO_2 substrate. (d) Photoluminescence of Bi_2Te_3 on Si/SiO_2 substrate.

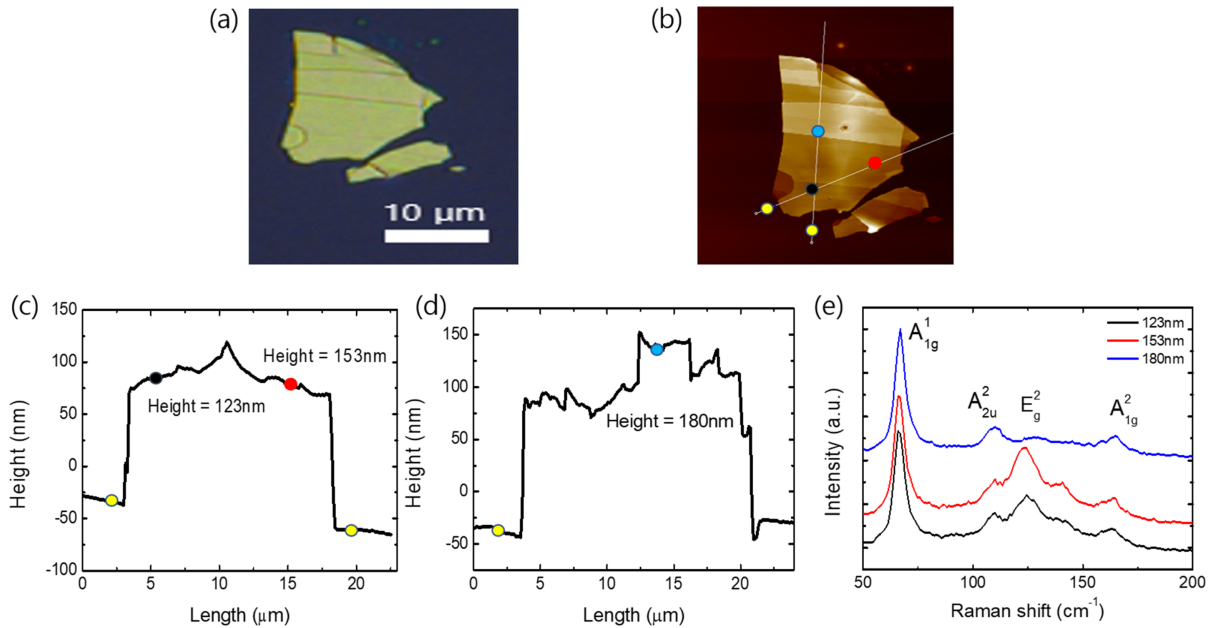


Fig. 3. (a) Optical microscope image of exfoliated Sb_2Te_3 . (b) AFM images of Sb_2Te_3 and (c), (d) thickness profiles. (e) Raman spectrums of Sb_2Te_3 on Si/SiO_2 substrate.

200 nm 미만의 Bi_2Te_3 두께에서 광발광 반응이 나타나는 결과와 유사하다고 할 수 있다 [13,14].

그림 3에서는 Sb_2Te_3 의 광학현미경 사진과 AFM, 그리고 라만 측정 결과를 보여준다. 그림 3(a)는 Bi_2Te_3 플레이크의 광학현미경의 사진을 보여주고 있으며 두께 단차를 갖는 플레이크를 박리 후 SiO_2/Si 기판에 전사된 형태를 나타내고 있다. 그림 3(b)와 그림 3(c), (d)에서는 AFM 사진과 두께 단차를 측정한 결과를 보여주고 있으며, 각각의 위치별로 123 nm, 153 nm, 180 nm의 두께를 갖는 것으로 확인되었다. 그림 3(e)에서는 Sb_2Te_3 플레이크의 두께에 따른 라만과 광발광에 대한 측정이 진행되었고, 이에 대한 측정 결과를 보여주고 있다. 각각의 두께를 가진 Sb_2Te_3 플레이크에서 65.9 cm^{-1} (A_{1g}^1), 110.08 cm^{-1} (A_{1g}^2), 124.37 cm^{-1} (E_g^2), 그리고 163.74 cm^{-1} (A_{1g}^2)에서 라만 봉우리가 나타남을 확인할 수 있었다 (그림 3(e), 표 1). E_g^2 는 Sb와 Te 원자가 각 원자층에 평면상에서 서로 반대 방향으로 진동하는 모드이고, A_{2u}^2 는 원자층의 Sb는 진동하지 않고 Sb 원자의 위 아래에 위치한 Te 원자가 원자층에 수직인 방향으로 서로 반대 방향으로 진동하는 모드이며, A_{1g}^1 , A_{1g}^2 는 각각 Sb와 Te 원자가 원자층에 수직인 방향으로 서로 같은 방향과 반대 방향으로 진동하는 모드이다. [17,18] A_{2u}^2 , A_{1g}^2 두 개의 라만 봉우리에서는 각각 A_{2u}^2 (110.08 cm^{-1}), A_{1g}^2 (163.74 cm^{-1})의 값을 가지며, 두께에 따른 변화는 거의 발견되지 않았다. 하지만 A_{1g}^1 라만 봉우

리에서는 두꺼워질수록 청색 이동 (blue shift) 현상이 나타났고, E_g^2 라만 봉우리에서는 두꺼워질수록 적색 이동 (red shift) 현상이 나타났으며, 더욱 두꺼워질 경우 (180 nm) 봉우리가 사라지는 것을 확인할 수 있었다. Sb_2Te_3 의 두께별 라만 봉우리 세기는 거의 변화가 없었으며, 광발광은 실험적으로 발견되지 않았다.

우리는 AFM을 이용하여 $\text{Bi}_{0.5}\text{Sb}_{1.5}\text{Te}_3$ 플레이크의 여러 두께를 측정할 수 있었다. 이 실험에서는 다양한 두께를 갖는 $\text{Bi}_{0.5}\text{Sb}_{1.5}\text{Te}_3$ 플레이크들의 라만 분석과 광발광을 측정하여 물질의 광학적 특성을 파악하였다. 그림 4(a)-(c)에서 다양한 두께를 갖는 형태의 $\text{Bi}_{0.5}\text{Sb}_{1.5}\text{Te}_3$ 플레이크들의 광학현미경 사진을 보여주고 있으며 각각의 플레이크들을 AFM을 통하여 두께를 측정한 결과 각각 90 nm, 176 nm, 267 nm의 두께를 갖는 것으로 확인되었다 (그림 4(d), (e), (f)). 그 결과를 토대로 그림 5에서는 $\text{Bi}_{0.5}\text{Sb}_{1.5}\text{Te}_3$ 플레이크에 대한 라만과 광발광의 결과를 나타냈다. 각각의 다양한 두께를 가진 $\text{Bi}_{0.5}\text{Sb}_{1.5}\text{Te}_3$ 플레이크들에서 대표적으로 63.45 cm^{-1} (A_{1g}^1), 87.87 cm^{-1} (U), 116.46 cm^{-1} (E_g^2), 그리고 136.22 cm^{-1} (A_{1g}^2)에서 라만 봉우리가 나타남을 확인할 수 있었다. $\text{Bi}_{0.5}\text{Sb}_{1.5}\text{Te}_3$ 는 Sb_2Te_3 의 결정 구조에서 Sb 원자 자리에 Bi 원자가 대체되어 들어가는 구조를 가지고 있다 [12]. 이로 인해 $\text{Bi}_{0.5}\text{Sb}_{1.5}\text{Te}_3$ 의 진동 모드는 Sb_2Te_3 와 유사한 진동 모드를 갖게 된다. A_{1g}^1 와 A_{1g}^2 는 각각 Sb 혹은 Bi 원자가 Te 원자와 서로 같은 방향과 반대

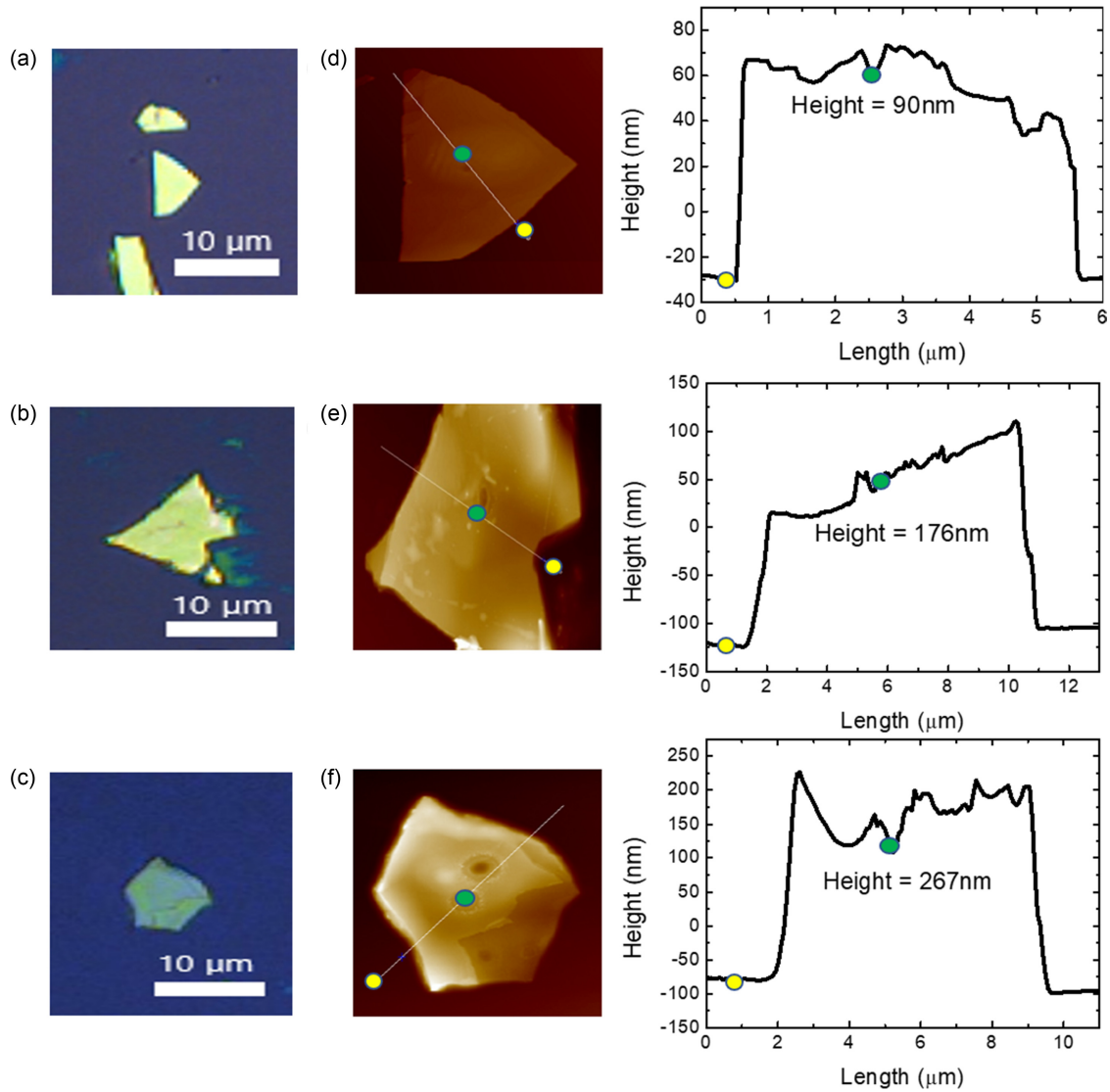


Fig. 4. (a)~(c) Optical microscope images of exfoliated $\text{Bi}_{0.5}\text{Sb}_{1.5}\text{Te}_3$. (d)~(f) AFM images of each flake of $\text{Bi}_{0.5}\text{Sb}_{1.5}\text{Te}_3$ and thickness profiles.

방향으로 원자층에 수직인 방향으로 진동하는 모드이며, E_g^2 는 Sb 혹은 Bi 원자가 Te 원자와 서로 반대 방향으로 원자층에 수직인 방향으로 진동하는 모드이다 [18,19]. 표 1에서 확인할 수 있듯이 A_{1g}^1 , A_{1g}^2 두개의 라만 봉우리에서는 두께에 의한 변화가 거의 없었다. 하지만 E_g^2 라만 봉우리에서는 두께가 얇아질수록 청색 이동 현상이 나타났으며, U (87.81 cm^{-1})의 라만 봉우리에서는 얇아질수록 봉우리 세기가 점차 약해지다가 사라지는 현상을 보여주고 있다. 또한, 두께가 얇아질수록 E_g^2/A_{1g}^1 봉우리 세기의 비율은 증가하는 반면, E_g^2/A_{1g}^2 비율은 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 이번 실험에서 처음 발견된 두께에 따른 봉우리의 세기 변화를 갖는 U (87.81 cm^{-1})의 라만 봉우리는

$\text{Bi}_{0.5}\text{Sb}_{1.5}\text{Te}_3$ 의 두께를 예측할 수 있는 물리량으로 활용될 수 있음을 발견하였다. 그림 5(b)에서는 $\text{Bi}_{0.5}\text{Sb}_{1.5}\text{Te}_3$ 플레이크의 두께 별 광발광 특성 결과를 확인할 수 있다. MoS_2 , WS_2 와 같은 대표적 2차원 전이금속 디칼코젠 화합물 들은 보통 밴드 갭과 광발광 특성이 일치한다 [20,21]. 반면 TI 소재들의 밴드 갭은 0.14-0.22 eV 정도로 매우 작지만 [22-24], 광발광 특성에서는 대부분 2 eV 이상의 높은 에너지 특성을 보여준다 [13,14]. 이번 실험에서도 $\text{Bi}_{0.5}\text{Sb}_{1.5}\text{Te}_3$ 광발광 봉우리 결과는 두께 별로 486.3-575.84 nm의 파장에서 발견이 되었고, 이 값은 2.15-2.54 eV의 에너지를 갖는 것을 확인할 수 있었다. 그림 5(b)에서 확인할 수 있듯이 광발광 봉우리의 범위가 매우 광범위

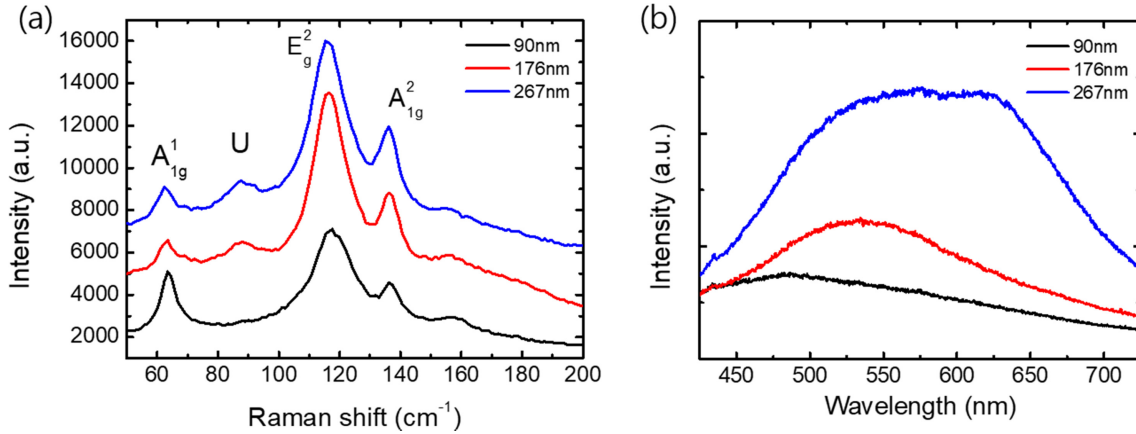


Fig. 5. (a) Raman Spectra of $\text{Bi}_{0.5}\text{Sb}_{1.5}\text{Te}_3$ on Si/SiO₂ substrate. (b) Photoluminescence of $\text{Bi}_{0.5}\text{Sb}_{1.5}\text{Te}_3$ on SiO₂/Si substrate.

하며, 비대칭적인 모습을 보여주는데, 이는 Bi_2Te_3 의 강력한 스핀-궤도 결합 특성과 유사한 스핀-궤도 분할 봉우리가 존재할 수 있음을 암시한다 [25]. 광발광 분석법은 전자-홀 쌍의 재결합의 효율성을 판단할 수 있는 지표로 사용될 수 있다 [14]. $\text{Bi}_{0.5}\text{Sb}_{1.5}\text{Te}_3$ 의 플레이크의 두께가 얇아질수록 청색 이동 (blue shift) 현상이 나타났으며, 봉우리의 반치폭 계산을 통해 두께가 얇아질수록 반치폭이 감소하는 것으로 보아 광발광 효율이 증가함을 확인할 수 있었다.

그림 6는 Bi_2Te_3 와 $\text{Bi}_{0.5}\text{Sb}_{1.5}\text{Te}_3$ 벌크 (bulk) 플레이크의 광 반응도 (Photoresponsivity) 측정 결과를 보여준다. 그림 6(a), (b)에서 Bi_2Te_3 플레이크의 광 반응도를 Si 및 Ge 광 검출기(Photodetector)의 측정 범위에서 V_d (드레인 전압)를 1~3 V로 조절하며 측정된 결과를 보여주고 있다. Bi_2Te_3 벌크 (bulk) 플레이크는 가시광 (visible)-근적외선 (near Infrared) 영역에서 광반응이 모두 발견되었고, 300-850 nm 범위의 파장에서 광 반응도가 선형적으로 증가하였다. 흥미롭게도 Bi_2Te_3 플레이크는 근적외선 영역인 1800 nm

파장에서 가장 높은 광 반응도 (335.7 A/W)를 갖는 것을 확인하였다. 이는 이전 연구에서 진행된 나노구조 Bi_2Te_3 의 광 반응도 실험과 유사한 결과를 보여주며 [10], Bi_2Te_3 플레이크의 광 검출의 측정 가능 범위가 자외선 (ultraviolet) - 가시광 (visible) - 적외선 영역 (infrared) 까지의 매우 넓은 파장에서 가능함을 보여준다.

그림 6(c)에서는 Si 광 검출기의 측정 범위인 300-1100 nm의 파장에서 $\text{Bi}_{0.5}\text{Sb}_{1.5}\text{Te}_3$ 의 광 반응도를 V_d 를 1 V에서 3 V로 조절하며 측정된 결과를 보여주고 있다. 광 반응도가 가시광 영역에서 Bi_2Te_3 와 유사한 광 반응을 보임을 관찰할 수 있다. 반면 그림 6(d)에서 볼 수 있듯이 Ge 광 검출기의 측정 범위인 800-1800 nm의 파장에서의 광 반응도는 측정 파장이 길어 짐에 따라 광 반응도가 상승하였으며, 특히 1800 nm 파장에서 Bi_2Te_3 광 반응도의 약 두 배인 661.5 A/W의 가장 높은 광 반응도를 발견하였다. 이는 $\text{Bi}_{0.5}\text{Sb}_{1.5}\text{Te}_3$ 플레이크의 광 검출의 측정 가능 범위가 자외선 (ultraviolet) - 가시광 (visible) - 적외선 영역 (infrared) 까지 매우 넓은 파장에서 가능함을 보여준다. 이는 자외선

Table 1. Raman peaks in Bi_2Te_3 , Sb_2Te_3 , $\text{Bi}_{0.5}\text{Sb}_{1.5}\text{Te}_3$ flakes.

Sample	Thickness	Raman Peaks			
Bi_2Te_3	168nm	61.26(A_{1g}^1)	101.12(E_g^2)	130.83(A_{1g}^2)	...
	241nm	61.26(A_{1g}^1)	101.12(E_g^2)	133.03(A_{1g}^2)	...
	485nm	60.14(A_{1g}^1)	100.01(E_g^2)	134.12(A_{1g}^2)	...
Sb_2Te_3	123nm	65.9(A_{1g}^1)	110.08(A_{2u}^2)	124.37(E_g^2)	163.74(A_{1g}^2)
	153nm	65.9(A_{1g}^1)	110.08(A_{2u}^2)	123.28(E_g^2)	163.74(A_{1g}^2)
	180nm	67.01(A_{1g}^1)	110.08(A_{2u}^2)	...	163.74(A_{1g}^2)
$\text{Bi}_{0.5}\text{Sb}_{1.5}\text{Te}_3$	90nm	63.45(A_{1g}^1)	...	117.56(E_g^2)	136.22(A_{1g}^2)
	167nm	63.45(A_{1g}^1)	87.81(U)	116.46(E_g^2)	136.22(A_{1g}^2)
	276nm	62.34(A_{1g}^1)	87.81(U)	115.36(E_g^2)	136.22(A_{1g}^2)

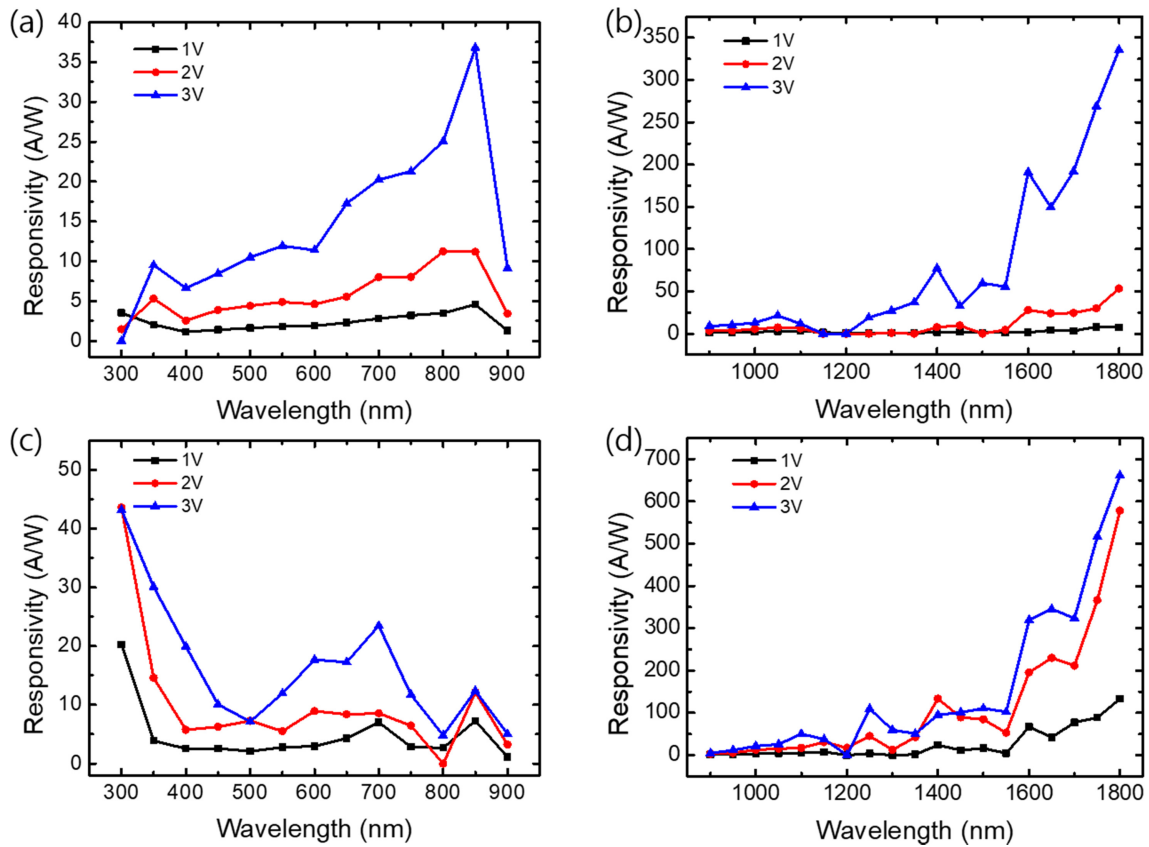


Fig. 6. (a), (b) The wavelength dependent responsivity of Bi_2Te_3 and (c), (d) $\text{Bi}_{0.5}\text{Sb}_{1.5}\text{Te}_3$ corrected by Si and Ge detectors, respectively (Si detector: 300-1100 nm, Ge detector: 800-1800 nm).

(ultra violet) 및 가시광 (visible) 영역 보다는 근적외선 (near Infrared) 영역의 광 검출기로 응용하기에 더 유용한 소재임을 알 수 있다.

3. 결 론

기계적으로 박리 후 SiO_2/Si 기판에 전사한 Bi_2Te_3 , Sb_2Te_3 및 $\text{Bi}_{0.5}\text{Sb}_{1.5}\text{Te}_3$ 플레이크들(flakes)의 광학 및 광전 자적 물성을 고찰하였다. Bi_2Te_3 플레이크는 A_{1g}^2 라만 진동 모드는 두께가 두꺼워질수록 청색 이동 (blue shift)의 결과를 보였고, Sb_2Te_3 는 플레이크의 두께가 두꺼워질수록 A_{1g}^1 및 E_g^2 의 라만 봉우리에서 각각 청색 이동 (blue shift) 및 적색 이동(red shift) 결과를 보였다. 이번 실험에서 처음 발견된 $\text{Bi}_{0.5}\text{Sb}_{1.5}\text{Te}_3$ 플레이크의 U (87.81 cm^{-1})의 라만 진동 모드는 100 nm 미만의 얇은 박막에서는 비활성화 되는 것을 발견하였다. 광 발광 반응 측정 결과 Bi_2Te_3 의 경우 200 nm 미만의 두께에서 약 2.48 eV 에너지에서 광 발광 반응이 나타난 반면 $\text{Bi}_{0.5}\text{Sb}_{1.5}\text{Te}_3$ 의 경우 두께변화에 따라 2.15-2.54 eV 범위의 에너지에서 광 발광 반응이

나타남을 확인하였다. 광 검출기의 특성 평가 결과 벌크 Bi_2Te_3 및 $\text{Bi}_{0.5}\text{Sb}_{1.5}\text{Te}_3$ 플레이크는 300-1800 nm 파장 대역에서 광 검출이 가능한 광 반응도를 보였으며, 특히 근적외선 영역에서 매우 높은 광 반응도(661.5 A/W)를 보였다. 이는 차세대 근적외선 영역 광 검출기 개발에 있어 Bi_2Te_3 및 Sb_2Te_3 , 그리고 그와 관련된 화합물 소재를 활용할 경우 높은 잠재력을 갖고 있다.

감사의 글

This work was supported by the National Research Foundation of Korea (NRF-2021R1C1C1006147), “Research Base Construction Fund Support Program” funded by Jeonbuk National University in 2022.

REFERENCES

1. D. Hsieh, D. Qian, L. Wray, Y. Xia, Y. S. Hor, R. J. Cava,

- and M. Z. Hasn, *Nature* **452**, 970 (2008).
2. Haijun Zhang, Chao Xing Liu, Xiao Liang Qi, Xi Dai, Zhong Fang, and Shou Cheng Zhang, *Nat. Phys.* **5**, 438 (2009).
 3. B. Andri Bernevig, Taylor L. Hughes, and Shou Cheng Zhang, *Science* **314**, 1757 (2006).
 4. Joel E. Moore, *Nature* **464**, 194 (2010).
 5. A. R. Akhmerov, Johan Nilsson, and C.W. J. Beenakker, *Phys. Rev. Lett.* **102**, 216404 (2009).
 6. O. Ben Yehuda and R. Shuker, *J. Appl. Phys.* **101**, 113707 (2007).
 7. G. Jeffrey Snyder and Eric S. Toberer, *Nature Materials* **7**, 105 (2008).
 8. Jinghua Liang, Long Cheng, Jie Zhang, Juijun Liu, and Zhenyu Zhang, *Nanoscale* **8**, 8855 (2016).
 9. D. A. Wright, *Nature* **181**, 834 (1958).
 10. Alka Sharma, A. K. Srivastava, T. D. Senguttuvan, and Sudhir Husale, *Sci. Rep.* **7**, 17911 (2017).
 11. K. M. F. Shahil, M. Z. Hossain, V. Goyal, and A. A. Balandin, *J. Appl. Phys.* **111**, 054305 (2012).
 12. Xin mu, Hongyu Zhou, Danqi He, Wenyu Zhao, Ping Wei, Wanting Zhu, Xiaolei Nie, Huijun Liu, and Qingjie Zhang, *Nano Energy* **33**, 55 (2017).
 13. Naveed Hussain, Qingyun Zhang, Jialiang Lanng, Ruoyu Zhang, Murtaza Muhammad, Kai Huang, Thibault Cosseron De Villenoisy, Huang Ya, Altaf Karim, and Hui Wu, *Adv. Optical Mater.* **6**, 1701322 (2018).
 14. Y. Saberi, S. A. Sajjadi, and H. Mansouri, *J. Mater. Sci. Mater Electron* **31**, 18988 (2020).
 15. Jiandong Yao, Zhaoqiang Zhen, and Guowei Yang, *J. Mater. Chem. C* **4**, 7831 (2016).
 16. Fengjiao Liu, Longyu Hu, Mehmet Karakaya, Pooja Puneet, Rahul Rao, Ramakrishna Podila, Sriparna Bhattacharya, and Apparao M. Rao, *Sci. Rep.* **7**, 16535 (2017).
 17. Manavendra P. Singh, Manab Mandal, K. Sethupathi, M. S. Ramachandra Rao, and Pramoda K. Nayak, *Nanoscale Res. Lett.* **16**, 22 (2021).
 18. Chaohua Zhang, Zeping Peng, Zhong Li, Ligen Yu, Khiam Aik Khor, and Qihua Xiong, *Nano Energy* **15**, 688 (2015).
 19. Manju Bala, Anha Masarrat, Vishnu Kumar, Sunil Ojha, K. Asokan, and S. Annapoorni, *J. Appl. Phys.* **127**, 245108 (2008).
 20. Shinichiro Mouri, Yuhei Miyauchi, and Kazunari Matsuda, *Nano Lett.* **13**, 5944 (2013).
 21. Humberto R. Gutierrez, Nestor Perea-Lopez, Ana Laura Elías, Ayse Berkdemir, Bei Wang, Ruitao Lv, Florentino Lopez-Urias, Vincent H. Crespi, Humberto Terrones, and Mauricio Terrones, *Nano Lett.* **13**, 3447 (2013).
 22. Kun Zhao, Yi Wang, Chao Xin, Yu Sui, Xianjie Wang, Yang Wang, Zhiguo Liu, and Bingsheng Li, *J. Alloys Compd.* **661**, 428 (2016).
 23. Abdullahi Lawal, A. Shaari, R. Ahmed, Norshila Jarkoni, and Results Phys. **7**, 2302 (2017).
 24. Lipeng Hu, Fanchen Meng, Yanjie Zhou, Jibiao Li, Allen Benton, Junqin Li, Fusheng Liu, Chaohua Zhang, Heping Xie, and Jian He, *Adv. Funct. Mater.* **30**, 2005202 (2020).
 25. Anthony Vargas, Fangze Liu, and Swastik Kar, *Appl. Phys. Lett.* **106**, 243107 (2015).