

# 그래핀/사파이어 기판상에 스퍼터링 후 열처리된 VO<sub>2</sub>박막의 구조 및 광학적 특성변화 연구

김근수<sup>a\*</sup> · 김형근<sup>b</sup> · 김예나<sup>b</sup> · 한승호<sup>b</sup> · 배동재<sup>a</sup> · 양우석<sup>b\*</sup>

<sup>a</sup>세종대학교 물리학과 및 그래핀 연구소, 서울 143-747

<sup>b</sup>전자부품연구원 전자소재 응용연구센터, 성남 463-816

(2013년 2월 26일 받음, 2013년 3월 7일 수정, 2013년 3월 7일 확정)

이산화바나듐(VO<sub>2</sub>)는 써모크로믹(thermochromic) 물질로서 온도변화에 따른 구조적 상전이에 의해 전기적, 광학적 특성을 스위칭 할 수 있는 매력적인 소재이며, 최근 신소재로서 그 연구가 활발한 그래핀 역시, 전기적으로나 광학적으로 그 특성이 우수하여 투명전극에 관한 연구가 아주 활발하게 진행되고 있다. 이에 우리는 VO<sub>2</sub>와 그래핀 두 가지 소재를 접목했을 경우 나타나는 현상을 그래핀의 층 수와 온도를 변수로 하여 형성된 박막의 구조와 광학적 특성을 측정하고 분석하였다. 본 연구 결과에 따르면 그래핀 필름이 전사된 사파이어 기판 위에 형성된 VO<sub>2</sub> 박막의 표면구조 및 특성이 bare 사파이어 기판 위의 VO<sub>2</sub> 박막보다 그래핀이 작고 밀도가 높아 균일하였으며, IR 영역에서의 광투과도 역시 그래핀 필름이 있을 경우 ~10% 정도 개선됨을 확인하였다. 아울러 평균상전이 온도를 낮출 수 있으며, 상전이 히스테리시스 변화폭 또한 좁아지는 것을 확인하였다.

**주제어 :** 이산화바나듐, 그래핀, 사파이어, 스퍼터링, 구조분석, 광학적 특성

## I. 서 론

VO<sub>2</sub>는 잘 알려진 대표적인 써모크로믹(Thermochromic) 재료로서 ~340 K (~68°C) 전후 온도에서 구조적인 상전이 일어난다. 다시 말해, 상온근처에서는 monoclinic 구조를 갖고 전기적으로 절연체에 가까워서 저항이 아주 크고 IR 투과도가 좋으나, 임계온도 이상에서는 Tetragonal (or Rutile) 구조로 상전이 되어 전기적으로 도체에 가까워서 저항이 아주 작고, IR 투과도가 감소한다 [1-3]. 이러한 특성으로 인하여 VO<sub>2</sub>를 활용한 광학 스위치, IR 센서 및 스마트 윈도우 등에 응용과 관련된 연구보고들이 있다 [4-6]. 아울러 보다 많은 응용성을 확보하기 위하여 임계 온도를 상온 근처로 내리려는 연구가 병행되고 있으며, 대표적인 예로써 VO<sub>2</sub>에 텅스텐(W)과 같은 금속을 도핑 하거나 표면 응력을 이용하여 임계온도를 상온근처(29°C)까지 낮출 수 있다는 선행 연구 보고가 있다 [7-9].

한편, 그래핀은 2차원 구조로 탄소가 6각형 벌집 모양으로 배열된 구조를 가지며, 두께는 원자 한층 정도이다. 이처럼 아주 얇고, 규칙적인 탄소 결정구조는 그래핀의 물리적, 화학적, 기계적, 열적 특성 등을 매우 뛰어나게 만든다

[10-14]. 아울러, 얇은 두께로 인하여 가시광선 영역에서 그래핀 한 층의 투과도는 97.7%에 이르며, 이러한 특성으로 인하여 태양전지, 터치스크린, 등 투명전극으로의 응용 가능성연구가 활발히 진행 중이다 [15-18].

최근 그래핀의 연구동향을 살펴보면, 그래핀과 다른 원자층 2D-소재들을 적층하여 다양한 기초 물성 연구와 보다 많은 기능성을 부여한 응용 가능성에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. 예를 들면, graphene/h-BN 구조에서 향상된 그래핀의 전기적 전하이동도 개선, graphene [또는 MoS<sub>2</sub>]/h-BN/graphene 구조를 활용한 전계효과 트랜지스터 응용 등이 있다. 또한 graphene/SAM/Sub를 활용한 그래핀 도핑, 유기물 나노와이어 채널과 그래핀전극을 접목한 OFETs, 그래핀 기판에서의 나노와이어 합성 등에 관한 연구가 또 다른 예들이다 [19-23].

이에 본 연구에서는 그래핀 필름 위에 V<sub>x</sub>O<sub>y</sub>박막을 증착하여, 열처리함으로써 대면적 VO<sub>2</sub>/graphene하이브리드 소재를 형성시킬 수 있음을 보고하고, 그래핀의 층 수 및 온도변화에 따른 VO<sub>2</sub> 박막의 구조와 다양한 광응답 특성에 관하여 논하겠다. 한편, 본 연구에서 VO<sub>2</sub> 및 그래핀 박막을 지지하기 위한 기판으로써, 구조적, 열적, 광학적으로 본

\* [전자우편] kskim2676@sejong.ac.kr, wsyang@keti.re.kr

실험에 가장 적합한 C-cut 사파이어 기판을 사용하였다.

## II. 실험방법

우리는 그래핀 층수에 따른 VO<sub>2</sub>박막(40nm)의 광학적 특성을 분석하였다. 시료는 양쪽 폴리싱 된 c-cut 사파이어 기판 위에 CVD SLG를 전사하는 공정을 반복하여 0~4 L까지 층수가 다른 그래핀 기판을 준비한 후 [18], sputtering에 의해 V<sub>x</sub>O<sub>y</sub>박막을 형성 시키고, post-annealing에 의해 VO<sub>2</sub> phase를 형성 시켰다 [24]. Fig. 1에서 (a)는 그래핀 합성용 CVD 장비, (b)는 바나듐산화막 증착용 sputter 장비며, (c)~(e)는 시료의 준비과정을 간략히 도식화한 그림이다.

### 1. CVD에 의한 그래핀의 합성과 사파이어 기판으로의 전사

먼저 그래핀 시료의 준비는 CVD에 방법으로 구리 호일 위에 단일층 그래핀(single layer graphene, SLG)을 합성한다. 그래핀의 합성조건은 구리호일을 수소 10 sccm을 흘려주면서 90 mTorr 압력을 유지하고 1,000°C에서 1시간 정도 전처리를 한 후, 수소 10 sccm, 메탄 15 sccm 정도를 흘려주면서 압력을 560 mTorr 정도 유지하면서 25 min 동안 그래핀을 합성한다. 그래핀이 합성된 구리호일 위에

PMMA막을 스핀코팅 한 후, 0.1 M ammonium persulfate 용액에 띄워서 구리를 에칭한다. 구리가 모두 에칭되고 나면 얇고 투명한 PMMA/그래핀 막이 에칭용액 수면위에 떠 있게 된다. 이것을 DI-water에 옮기는 방법을 반복하여 에칭용액 및 잔류물을 충분히 행군 후, 사파이어 기판으로 떼서 주름이 가지 않도록 잘 말린다. 이러한 전사방법으로 사파이어 기판에 그래핀을 적층할 수 있다. 적층한 횟수를 반복함으로써 그래핀의 층수를 조절할 수 있다. 매회 적층 공정마다 아세톤에서 PMMA를 녹여내고, 매회 반복 적층 전에 PMMA 찌꺼기를 완벽하게 제거하기 위해 350°C 저압 (base pressure:  $1 \times 10^{-7}$  Torr) 알곤(Ar) 분위기(10 sccm)에서 3시간 동안 열처리하였다 [25].

### 2. 준비된 그래핀/사파이어 기판위에 스퍼터링에 의해 V<sub>x</sub>O<sub>y</sub>박막 증착 후 열처리 공정을 통한 VO<sub>2</sub> 박막형성

위와 같은 과정으로 준비된 그래핀 기판[Fig. 1(c)] 위에 sputtering에 의해 V<sub>x</sub>O<sub>y</sub>박막(~40 nm)을 형성 시키고 [Fig. 1(d)], 산소분위기(50 sccm;  $\sim 10^{-5}$  Pa)에서 500°C에서 후열처리 공정을 180 min 동안 수행함으로써 VO<sub>2</sub> phase를 형성[Fig. 1(e)] 시켰다 [24].

## III. 실험결과 및 고찰

Fig. 2의 (a)의 사진은 각 시료(0~4 L)에 대한 실제 사진이다. 각각의 시료들을 원자힘 현미경(Atomic Force Microscope, AFM)을 이용하여 표면이미지를 측정 분석해 본바 Fig. 2의 (b)~(b4)와 같은 양상을 보였다. Fig. 2(b)는 그래핀이 없는 상태의 사파이어 기판위에 증착된 VO<sub>2</sub>이고, (b1)은 한 층(1LG), (b2)은 두 층(2LG), (b3) 세 층(3LG), (b4)은 네 층(4LG)의 그래핀이 전사된 사파이어 기판위에 증착된 VO<sub>2</sub>의 표면 AFM 이미지이다. 측정된 이미지를 보면 알 수 있듯, 그래핀이 없는 c-cut 사파이어에 기판 위에 증착된 VO<sub>2</sub> 즉, Fig. 2의 (b)는 표면의 그래핀 사이즈와 분포가 고르지 않고 필름의 두께(높낮이) 분포도 임의적으로 나타난 반면에, 그래핀이 1~4층까지 올려진 사파이어 기판위에 증착된 VO<sub>2</sub> 필름 즉, Fig. 2의 (b1)~(b4))는 상대적으로 표면의 그래핀 사이즈와 분포와 필름의 두께(높낮이) 분포가 고르게 나타났다. AFM 이미지로부터 표면의

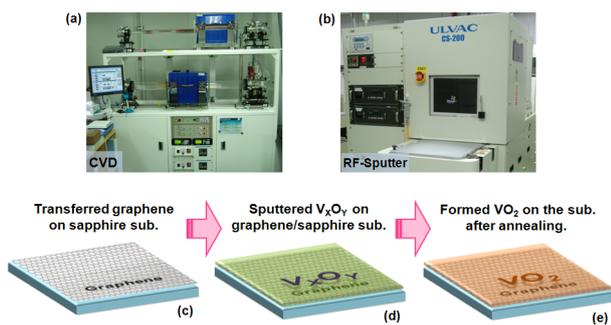


Figure 1. Photograph images of (a) CVD setup for graphene growth, (b) RF sputtering system for V<sub>x</sub>O<sub>y</sub> deposition and experimental process scheme for sample preparation; (c) prepared graphene-layers on sapphire substrate using layer-by-layer transfer process with PMMA, (d) sputtered V<sub>x</sub>O<sub>y</sub> film on prepared samples, (e) post-annealing process for VO<sub>2</sub> phase.

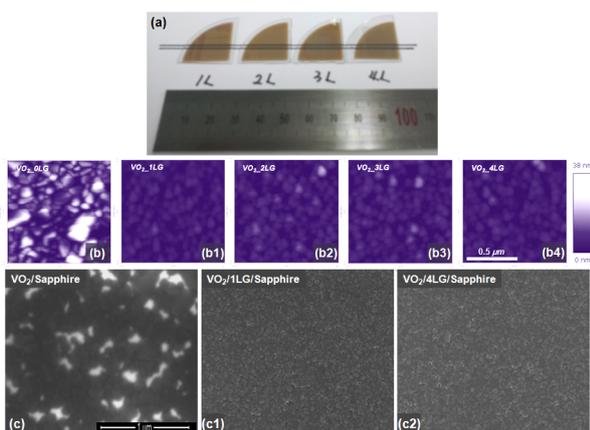


Figure 2. (a) Real photograph of prepared samples, (b) AFM topographic images for each samples; (b) VO<sub>2</sub>/Sapphire, (b1) VO<sub>2</sub>/1LG/Sapphire, (b2) VO<sub>2</sub>/2LG/Sapphire, (b3) VO<sub>2</sub>/3LG/Sapphire, (b4) VO<sub>2</sub>/4LG/Sapphire (scale bar=0.5 μm) and SEM images for (c) VO<sub>2</sub>/Sapphire, (c1) VO<sub>2</sub>/1LG/Sapphire, (c2) VO<sub>2</sub>/4LG/Sapphire (scale bar=1 μm).

거칠기를 수치적인 값인 RMS 값으로 평가해본 바, bare 사파이어에서는 8.6 nm, 1LG에서는 2.9 nm, 2LG에서는 3.2 nm, 3LG에서는 3.2 nm, 4LG에서는 2.9 nm 정도로 나타났다. 다시 말해, VO<sub>2</sub> 필름의 표면양상이 사파이어 기판에서 그래핀의 유무에 따라서 현저히 다르게 나타남을 확인하였다.

아울러, 같은 종류의 샘플들을 전자현미경으로 관찰해본 결과 Fig. 2의 (c)와 같이 VO<sub>2</sub> grain들이 bare 사파이어 기판에서는 약 150±50 nm 정도로 불균일하게 분포하며, 필름이 기판을 전체적으로 덮질 못하고 국소적으로 빈공간이 있어서 절연특성을 가진 사파이어 기판이 드러나서 전자가 기판에 쌓여서 빠져나가지 못함(charging effect)으로 인해 이미지 상에 하얀 부분으로 나타나고 있다. 반면에 그래핀이 적층된 사파이어 기판 표면에서는 Fig. 2의 (c1; VO<sub>2</sub>/1LG/사파이어), (c2; VO<sub>2</sub>/4LG/사파이어)와 같이 VO<sub>2</sub> grain들이 50±20 nm 정도의 크기로 형성되어 있음을 확인하였고, 전자현미경 이미지에서도 역시 AFM 이미지에서 조사된 바와 같이 VO<sub>2</sub> 필름의 표면양상이 사파이어 기판에서 그래핀의 유무에 따라서 현저히 다르게 나타남을 확인하였다.

우리는 XRD와 Raman 스펙트럼 분석장비를 이용하여 각 시료의 결정구조를 간접적으로 평가하였다. Fig. 3(a)는 각각의 시료에 대한 XRD data이다. 모든 시료에서 VO<sub>2</sub>

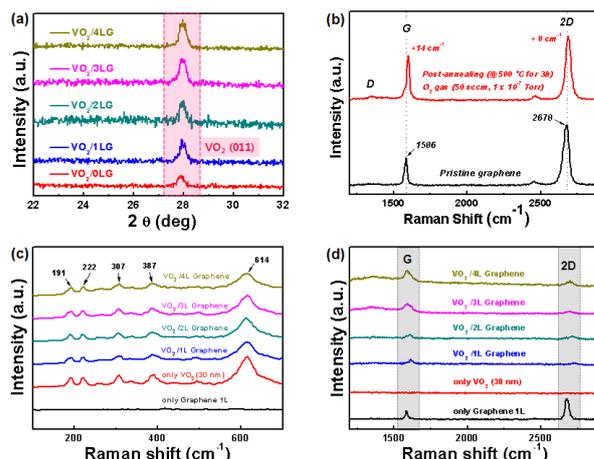


Figure 3. (a) XRD data for each samples, (b) Raman spectra of graphene (without VO<sub>2</sub> film) after post-annealing process, Raman spectra of graphene-free VO<sub>2</sub> film in comparison with graphene-supported 1LG, 2LG, 3LG, and 4LG films on sapphire substrate around (c) 100~700 cm<sup>-1</sup> (; VO<sub>2</sub>) range & (d) 1,200~2,900 cm<sup>-1</sup> (; graphene) range.

(111) phase가 잘 형성 되어 있음을 알 수 있고, 그래핀 층이 있는 VO<sub>2</sub> 시료에서 상대적으로 강한 피크세기를 보여주고 있다. Fig. 3(b)는 VO<sub>2</sub> phase를 형성시키기 위한 후열처리 공정 과정에서 발생할 수 있는 그래핀의 품질 변화를 평가하기 위하여, V<sub>x</sub>O<sub>y</sub>를 증착하지 않은 그래핀 시료만을 후열처리 공정과 같은 조건에서 처리를 했을 때 그래핀 시료에 대한 라만 스펙트럼 변화를 측정한 그래프이다. 그래프에서 볼 수 있듯이 1,350 cm<sup>-1</sup> 근처의 D-peak가 거의 증가하지 않는 것으로 보아 후열처리 공정 후에도 결함이 거의 발생하지 않는 것을 알 수 있었고, 1,580 cm<sup>-1</sup> 근처의 G-peak이 약간 오른쪽으로 이동하고 2,700 cm<sup>-1</sup> 근처의 2D-peak과의 비율(2D/G)이 감소하는 것으로 보아 그래핀이 산소에 의해 미량의 도핑 효과가 있음을 간접적으로 알 수 있다.

한편, Fig. 3(c)와 (d)는 아래쪽으로부터 한 층 그래핀, 그래핀이 없는 기판에서의 VO<sub>2</sub> 박막, 그래핀이 한 층, 두 층, 세 층, 네 층 있는 기판에서의 VO<sub>2</sub> 박막 시료에 대한 라만 스펙트럼이다. (c)는 100~700 cm<sup>-1</sup> 영역에서 VO<sub>2</sub> 상으로부터 나오는 포논 진동모드들을 평가한 것이고, (d)는 1,200~2,900 cm<sup>-1</sup> 영역에서 그래핀과 관련된 포논 진동모드들을 평가한 그래프이다. (c)에서 VO<sub>2</sub> 박막이 올려진 모든 시료에서 VO<sub>2</sub> 상(191, 222, 307, 387, 614 cm<sup>-1</sup>

등)이 잘 형성되어 있음을 알 수 있고, (d)에서는 그래핀이 올려진 모든 시료에서 그래핀과 관련된 peak가 잘 측정되고 있음을 알 수 있다. 한편, 올려진 VO<sub>2</sub>의 두께가 일정하기 때문에 그래핀의 층수가 증가할수록 G와 2D peak 세기가 상대적으로 강하게 측정되었음을 확인할 수 있었다.

서론에서 소개했던 바와 같이 VO<sub>2</sub> 온도에 따라서 상전이를 하는 써모크로믹 소재로 상전이 임계온도 이하에서는 전기적으로 절연체 특성을 갖고, 임계온도 이상에서는 도체 특성을 갖는다. 이러한 특성은 광학적 특성에도 밀접하게 연관되어 임계 온도 이하에서는 IR 광투과도가 좋은 반면에 임계 온도 이상에서는 IR 광투과도가 현저하게 떨어지게 된다.

이러한 이유로 우리는 준비된 각 시료들에 대하여 온도 변화에 따른 투과도 변화를 평가하였다.

Fig. 4의 (a)는 각 시료에 대한 400~2,500 nm 파장 영역에 따른 광투과도 변화를 상온(25°C)과 고온(100°C)에서 측정 비교한 것이다. 그래프에서 알 수 있듯이 IR 영역에서 광투과도의 변화가 상온과 고온에서 현저히 다르게 나타났음을 알 수 있다. 좀 더 자세히 보면, 그래핀 층이 없는 VO<sub>2</sub> 박막 시료와 그래핀 층이 있는 VO<sub>2</sub> 박막시료에서 IR 투과도 변화량이 다를 수 있다. 이러한 효과를 보다 더 면밀히 살펴보기 위해서 우리는 각 시료에 대한 온도 변화에 따른 IR 광투과도 변화를 파장을 2,500 nm로 고정하여 측정 분석하였다[Fig. 4(b)~(f)].

측정된 온도변화에 따른 IR 광투과도 그래프를 보면, 그

래핀이 없는 VO<sub>2</sub> 박막 [Fig. 4(b); VO<sub>2</sub>/사파이어]보다 그래핀이 있는 VO<sub>2</sub> 박막 [Fig. 4(c)~(f); VO<sub>2</sub>/그래핀(1L~4L)/사파이어]의 변화폭이 현저히 큼을 쉽게 관측할 수 있다. 층 수에 따른 상세한 변화폭은 Fig. 5(b)에서 다시 논할 것이며, 이에 대한 보완데이터는 Fig. 5(a) 표를 참고하기 바란다.

Fig. 4(b)와 (c)는 각각 bare 사파이어 기판에 형성된 VO<sub>2</sub>박막과 VO<sub>2</sub>/1LG/사파이어 시료의 온도 변화에 따른 IR ( $\lambda=2,500$  nm)에 대한 투과도의 변화곡선을 보여준다. 보다는피, 그래핀이 VO<sub>2</sub>박막과 사파이어 기판 사이에 없는 경우에 투과도의 변화율( $\Delta Tr=58.3\%$ )이 그래핀이 있는 경우보다 투과도 변화율( $\Delta Tr=72.3\%$ )이 현저히 작다. 한편, 평균 상전이 임계 온도와 히스테리시스 전자 [ $T_m \sim 62.2^\circ\text{C}$ ,  $\Delta T \sim 19.1^\circ\text{C}$ ]가 후자 [ $T_m = (T_h + T_c)/2 \sim 58.9^\circ\text{C}$ ,  $\Delta T \sim 17.3^\circ\text{C}$ ]보다 높고, 넓다[Fig. 5(a)표 참고]. Fig. 4(c)~(f) 역시 그래핀의 층 수 증가에 따른 VO<sub>2</sub>/그래핀(2~4L)/사파이어 시료의 IR (@2,500 nm) 투과도 변화효율과 평균 상전이 온도에 관한 그래프이다. 이 데이터들로부터 그래핀이 VO<sub>2</sub>와 사파이어 기판 사이에 존재하느냐 하지 않느냐에 따라서 효율이 현저히 다르게 나타남을 알 수 있다.

Fig. 4에서 측정된 데이터와 Fig. 2의 AFM 데이터를 면밀히 분석하여 Fig. 5(a)와 같이 각 시료에 따른 표면 거칠기(RMS), IR 투과도 변화율( $\Delta Tr$ ), 승온시 상전이 온도 ( $T_h$ ), 냉각시 상전이 온도( $T_c$ ), 평균 상전이 온도( $T_m$ ), 승온

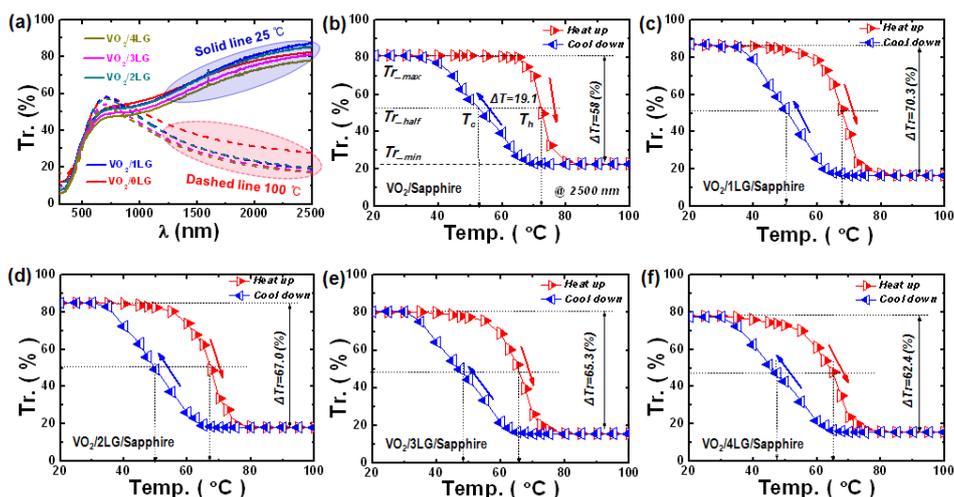


Figure 4. (a) Temperature and wavelength (400~2,500 nm) dependent transmittance of VO<sub>2</sub> films on layer-by-layer transferred graphene films, (b) optical transmission (at  $\lambda=2,500$  nm) of graphene-free VO<sub>2</sub> film in comparison with graphene-supported (c) 1LG, (d) 2LG, (e) 3LG and (f) 4LG films on sapphire substrate as a function of temperature.

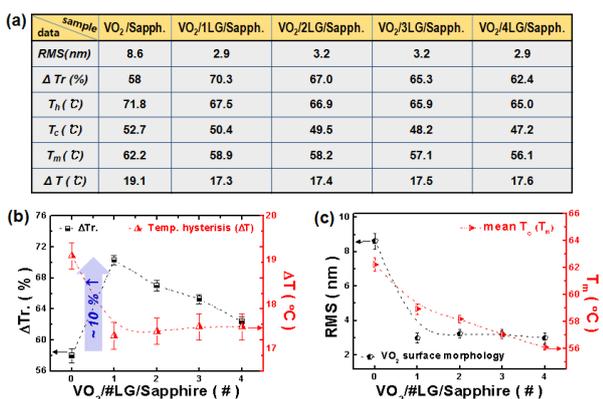


Figure 5. (a) Data table from the analysis of figure 4, (b) estimated efficiency of transmittance ( $\Delta Tr$ , @  $\lambda=2,500$  nm; left y-axis) & analyzed hysteresis ( $\Delta T$ ; right y-axis) for phase transition of VO<sub>2</sub> films deposited on various graphene layers (0~4L), (c) surface morphologies (RMS values from AFM images; left y-axis) of VO<sub>2</sub> films on different number of graphene layers and its mean phase transition temperature ( $T_m$ ; right y-axis).

및 냉각 시 상전이 온도 히스테리시스( $\Delta T$ ) 등의 데이터를 표를 만들고, 이로부터 각 시료에 대한 IR 투과도 변화율 ( $\Delta Tr$ ) 및 상전이 온도 히스테리시스( $\Delta T$ )를 Fig. 5의 (b)로, 표면 거칠기(root mean square; RMS) 및 평균 상전이 온도( $T_m$ ) Fig. 5의 (c)로 다시 시각화 하였다. Fig. 5(b)에서 볼 수 있듯이, 특별히 한 층의 그래핀이 있을 경우에 그래핀이 없을 경우에 비해 효율이 약 10% 정도 개선됨을 확인 하였다. 아울러 그래핀의 유무에 따라서 VO<sub>2</sub>의 상전이 히스테리시스( $\Delta T=T_h-T_c$ )의 변화율(red half open up-triangle @ 오른쪽 y축)이 현저히 다르게 나타나는데, 그래핀이 있는 경우가 히스테리시스 변화 폭이 상대적으로 좁아지는 것을 확인하였다.

Fig. 5(c)는 그래핀 층수 증가에 따라, 각 시료상에서 AFM으로 측정된 이미지를 분석하여 얻은 평균 표면 거칠기 데이터(black half open hexagon @ 왼쪽 y축)와 각 시료의 평균상전이 온도분포도(red half open right-triangle @ 오른쪽 y축)이다. 그래프에서 알 수 있듯이 그래핀이 있을 경우 그래핀이 없는 경우보다, 평균 표면 거칠기(RMS)가 현저히 개선되며, 그래핀의 층수가 증가함에 따라서 VO<sub>2</sub>의 평균상전이 온도가 내려가는 것을 확인하였다. 현재까지 보고된 VO<sub>2</sub>의 상전이 온도를 내리는 방법으로는 크게 두 가지가 있다. 첫 번째로는 금속을 도핑하는 방법 [7],

두 번째는 스트레인(표면응력)에 의한 방법이다 [8,9]. 본 실험의 결과는 두 번째 방법에 가까운 것으로 추정된다. 그래핀이 인터페이스 층으로 존재함으로써, 사파이어와 VO<sub>2</sub>는 재료가 다르기 때문에 열팽창계수가 다르긴 하나 모두 양의 값을 갖는다. 한편, 그래핀은 음(Negative)의 열팽창 계수를 갖는 것으로 알려져 있다 [26]. 다시 말해 거의 대부분의 물질이 열을 가하면 팽창하는 반면, 그래핀은 반대로 오히려 수축하는 특성을 가지고 있다. 따라서, 그래핀이 기판과 VO<sub>2</sub>사이 존재하는 상태에서 온도를 증가시킬 경우 VO<sub>2</sub>가 느끼는 표면 응력은 그래핀이 없을 때보다 상대적으로 커진다. 이러한 효과는 그래핀의 층수가 증가함에 따라 더 커질 것이고 VO<sub>2</sub>의 상전이 온도를 낮추는 역할을 하게 된다. 본 연구에서는 그래핀의 층수를 0~4L 까지만 증가를 시켰으나, 더 증가 시키면 상전이 온도를 더 내릴 수도 있을 것이다. 어느 정도 이상에서는 표면 응력이 포화되어 더 이상 내려가지 않을 것이며, 이는 그래핀 층수 증가에 따른 평균상전이 온도 변화 그래프[Fig. 5 (c)]의 curvature에서도 미루어 짐작할 수 있다.

#### IV. 결론

본 연구에서는 그래핀과 VO<sub>2</sub>박막을 접목한 복합 소재 박막을 합성하고, 이에 대한 온도변화에 따른 기본적인 광 특성을 측정 분석하였다. 온도 변화에 따른 VO<sub>2</sub>박막의 IR 투과도 변화율 특성결과에 따르면, 그래핀 필름이 전사된 사파이어 기판 위에 형성된 VO<sub>2</sub>특성이 bare 사파이어 기판 위의 VO<sub>2</sub>박막보다 약 10% 정도 개선됨을 확인하였고, 그래핀의 층수가 증가할수록 VO<sub>2</sub>의 평균 임계상전이 온도가 내려감을 확인하였다. 4층 그래핀이 있는 사파이어 기판에 형성된 VO<sub>2</sub>박막의 경우 평균 상전이 온도를 약 ~56°C까지 감소시킬 수 있었다. 아울러, 그래핀이 VO<sub>2</sub>박막과 사파이어 기판 사이에 있을 경우 그래핀이 없는 경우보다, VO<sub>2</sub>의 상전이 히스테리시스 변화 폭이 좁아지고, 평균 표면 거칠기 또한 개선이 되는 것으로 나타났다.

본 연구의 결과는 그래핀과 VO<sub>2</sub>의 전기적, 광학적 장점을 접목한 복합소재에 관한 기초 연구 결과로써, 향후 VO<sub>2</sub>/그래핀/투명기판을 활용한 광전소자의 응용 연구에 크게 이바지 할 수 있을 것으로 기대한다.

## 감사의 글

본 연구 논문은 2011년도 세종대학교 교내연구비 (20110106) 지원에 의한 논문임.

## 참고문헌

- [1] F. J. Morin, *Phys. Rev. Lett.* **3**, 34 (1959).
- [2] A. Zylbersztein and N. F. Mott, *Phys. Rev. B.* **11**, 4383 (1975).
- [3] R. M. Wentzcovitch, W. W. Schulz, and P. B. Allen, *Phys. Rev. Lett.* **72**, 3389 (1994).
- [4] L. A. Gea and L. A. Boatner, *Appl. Phys. Lett.* **68**, 3081 (1996).
- [5] M. M. Qazilbash, M. Brehm, B. G. Chae, P. C. Ho, G. O. Andreev, B. J. Kim, S. J. Yun, A. V. Balatsky, M. B. Maple, F. Keilmann, H. T. Kim, and D. N. Basov, *Science* **318**, 1750 (2007).
- [6] I. P. Parkin and T. D. J. Manning, *Chem. Edu.* **83**, 393 (2006).
- [7] T. D. Manning, I. P. Parkin, M. E. Pemble, D. Sheel, and D. Vernardou, *Chem. Mater.* **16**, 744 (2004).
- [8] B. Viswanath, C. Ko, Z. Yang, and S. Ramanathan, *J. Appl. Phys.* **109**, 063512 (2011).
- [9] H. Koo, S. Yoon, O. J. Kwon, K. E. Ko, D. Shin, S. H. Bae, S. H. Chang, and C. Park, *J. Mater. Sci.* **47**, 6397 (2012).
- [10] K. S. Novoselov, A. K. Geim, S. V. Morozov, D. Jiang, Y. Zhang, S. V. Dubonos, I. V. Grigorieva, and A. A. Firsov, *Science* **306**, 666 (2004).
- [11] Y. Zhang, T. W. Tan, H. L. Stormer, and P. Kim, *Nature* **438**, 201 (2005).
- [12] J. S. Bunch, S. S. Verbridge, J. S. Alden, A. M van der Zande, J. M. Parpia, H. G. Craighead, and P. L. McEuen, *Nano Lett.* **8**, 2458 (2008).
- [13] C. Lee, X. Wei, J. W. Kysar, and J. Hone, *Science* **321**, 385 (2008).
- [14] S. Chen, Q. Wu, C. Mishra, J. Kang, H. Zhang, K. Cho, W. Cai, A. A. Balandin, and R. S. Ruoff, *Nature Materials* **11**, 203 (2012).
- [15] R. R. Nair, P. Blake, A. N. Grigorenko, K. S. Novoselov, T. J. Booth, T. Stauber, N. M. R. Peres, and A. K. Geim, *Science* **320**, 1308 (2008).
- [16] K. S. Kim, Z. Yue, H. Jang, S. Y. Lee, J. M. Kim, Kwang. S. Kim, J. H. Ahn, P. Kim, J. Y. Choi, and B. H. Hong, *Nature* **457**, 706 (2009).
- [17] M. Cox, A. Gorodetsky, B. Kim, K. S. Kim, Z. Jia, P. Kim, C. Nuckolls, and I. Kymissis, *Appl. Phys. Lett.* **98**, 123303 (2011).
- [18] S. Bae, H. Kim, Y. Lee, X. Xu, J. S. Park, Y. Zheng, J. Balakrishnan, T. Lei, H. R. Kim, Y. I. Song, Y. J. Kim, Kwang. S. Kim, B. Ozyilmaz, J. H. Ahn, B. H. Hong, and S. Iijima, *Nature Nanotech.* **5**, 574 (2010).
- [19] C. R. Dean, A. F. Young, I. Meric, C. Lee, L. Wang, S. Sorgenfrei, K. Watanabe, T. Taniguchi, P. Kim, K. L. Shepard, and J. Hone, *Nature Nanotech.* **5**, 722 (2010).
- [20] L. Britnell, R. V. Gorbachev, R. Jalil, B. D. Belle, F. Schedin, A. Mishchenko, T. Georgiou, M. I. Katsnelson, L. Eaves, S. V. Morozov, N. M. R. Peres, J. Leist, A. K. Geim, K. S. Novoselov, and L. A. Ponomarenko, *Science* **335**, 947 (2012).
- [21] J. Park, W. H. Lee, S. Huh, S. H. Sim, S. B. Kim, K. Cho, B. H. Hong, and K. S. Kim, *J. Phys. Chem. Lett.* **2**, 841 (2011)
- [22] S. J. Kang, B. Kim, K. S. Kim, Y. Zhao, Z. Chen, P. Kim, and C. Nuckolls, *Adv. Mater.* **23**, 3531 (2011).
- [23] Y. J. Kim, J. H. Lee, and G. C. Yi, *Appl. Phys. Lett.* **95**, 213101 (2009).
- [24] H. Kim, S. J. Park, Y. Kim, H. Y. Jeong, A. R. Jang, K. S. Kim, S. H. Han, D. H. Yoon, K. S. Suh, H. S. Shin, T. Y. Kim, and W. S. Yang, submitted (2013).
- [25] A. Pirkle, J. Chan, A. Venugopal, D. Hinojos, C. W. Magnuson, and S. McDonnell, *Appl. Phys. Lett.* **99**, 122108 (2011).
- [26] D. Yoon, Y. W. Son, and H. Cheong, *Nano Lett.* **11**, 3227 (2011).

## Structural and Optical Characterizations of VO<sub>2</sub> Film on Graphene/Sapphire Substrate by Post-annealing after Sputtering

Keun Soo Kim<sup>a\*</sup>, Hyeongkeun Kim<sup>b</sup>, Yena Kim<sup>b</sup>, Seung-Ho Han<sup>b</sup>,  
Dong Jae Bae<sup>a</sup>, and Woo Seok Yang<sup>b\*</sup>

<sup>a</sup>Department of Physics and Graphene Research Institute, Sejong University, Seoul 143-747

<sup>b</sup>Electronic Materials and Device Research Center, Korea Electronics Technology Institute, Seongnam 463-816

(Received February 26, 2013, Revised March 7, 2013, Accepted March 7, 2013)

VO<sub>2</sub> is an attractive thermochromic material, in which its electrical and optical properties can be switched by the structural phase-transition about 68°C. Recently, graphene is also a rising material which is researched as a transparent electrode because of its superior electrical and optical characteristics. In this respect, we try to fabricate the hybridized films using VO<sub>2</sub> and graphene on transparent sapphire substrate and then we investigate a structure and characterize an optical property for the samples as a function of temperature. According to the result of IR-transmittance analysis of VO<sub>2</sub> films as a function of temperature, the graphene-supported sapphire substrates are better about 10% than the bare sapphire substrates. The mean phase transition temperatures are also decreased as the number of graphene-layers increased and the hysteresis of phase transitions are narrowed.

Keywords : VO<sub>2</sub>, Graphene, Sapphire, Sputtering, Structure, Optical properties

\* [E-mail] kskim2676@sejong.ac.kr, wsyang@keti.re.kr