Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society
Vol. 17, No. 9 pp. 502-507, 2016

http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2016.17.9.502
ISSN 1975-4701 / eISSN 2288-4688

그래핀 나노 시트 위에 2차원 나노구조를 갖는 VO_2의 성장

오수아, 김기출*
목원대학교 신소재화학공학과

Growth of Two-Dimensional Nanostrcutured VO_2 on Graphene Nanosheets

Su-Ar Oh, Ki-Chul Kim*
Department of Advanced Chemical Engineering, Mokwon University

요 약 이산화바나듐은 섭씨 68도에서 금속-절연체 상전이 특성을 나타내는 써모크로믹(thermochromic) 소재로서, 상전이 현상이 일어날 때 광학적, 전기적 성질이 급격히 변화하며, 이러한 상전이 현상은 가역적인 특성을 가지고 있다. 이산화바나듐의 금속-절연체 상전이 현상을 응용하기 위하여 상전이 온도를 상온 부근으로 낮추고자하는 많은 시도들이 있었으며, 직경 100 nm의 1차원 나노구조를 갖는 이산화바나듐 나노와이어의 경우 29 ºC 근처에서 상전이 현상이 일어남이 보고되었다. 본 연구에서는 기상 수송 방법(vapor transport method)을 사용하여 1차원 또는 2차원 나노구조를 갖는 이산화바나듐을 성장시켰다. 특히 동일한 성장 조건에서도 기판에 따라 다른 형태로 이산화바나듐이 성장하는 것을 확인하였다. 즉 Si 기판(Si\SiO_2(300 nm) 위에서는 1차원 나노와이어 형태의 이산화바나듐이 성장하였고, 그래핀 나노시트 위에서 합성된 이산화바나듐은 2차원 또는 3차원 나노구조를 가지고 성장하였다. 바나듐 옥사이드 나노구조체의 성장에 사용된 Si 웨이퍼 위에 박리-전사된 그래핀 나노시트 기판과 thermal CVD 시스템으로 성장된 1D 또는 2D & 3D 나노 구조를 갖는 VO_2의 결정학적 특성을 Raman 분광학으로 분석하였다. Raman 분석결과 성장된 바나듐 옥사이드는 VO_2 상을 갖는 것을 확인하였다.

Abstract Vanadium dioxide, VO_2, is a thermochromic material that exhibits a reversible metal-insulator phase transition at 68 ºC, which accompanies rapid changes in the optical and electronic properties. To decrease the transition temperature around room temperature, a number of studies have been performed. The phase transition temperature of 1D nanowire VO_2 with a 100 nm diameter was reported to be approximately 29 ºC. In this study, 1D or 2D nanostructured VO_2 was grown using the vapor transport method. Vanadium dioxide has a different morphology with the same growth conditions for different substrates. The 1D nanowires VO_2 were grown on a Si substrate (Si\SiO_2(300 nm), whereas the 2D & 3D nanostructured VO_2 were grown on an exfoliated graphene nanosheet. The crystallographic properties of the 1D or 2D & 3D nanostructured VO_2, which were grown by thermal CVD, and exfoliated-transferred graphene nanosheets on a Si wafer which was used as substrate for the vanadium oxide nanostructures, were analyzed by Raman spectroscopy. The as-grown vanadium oxide nanostructures have a VO_2 phase, which are confirmed by Raman spectroscopy.

Keywords : 2-dimensional nanostructure, graphene nanosheet, phase transition, thermochromic, vanadium dioxide

이 논문은 2016년도 정부(교육부)의 재원으로 한국과학창의재단(2016년도 학부생 연구프로그램)의 지원을 받아 수행된 연구임.
This work was supported by Korea Foundation for Advancement of Science & Creativity(KOFAC) grant funded by Ministry of Education(MOE).
*Corresponding Author : Ki-Chul Kim (Mokwon University)
Tel: +82-42-829-7489 email: kckim30@mokwon.ac.kr
Received August 26, 2016 Revised September 8, 2016
Accepted September 9, 2016 Published September 30, 2016

1. 서론

이산화바나듐(VO_2)은 잘 알려진 써모크로믹 소재로서 상온에서는 monoclinic 결정구조를 가지며, 전기적으로 절연체에 가깝게 저항이 매우 크고, 광학적으로 적외선 영역에서 투명하지만, 구조상전이가 일어나는 임계온도(T_c, critical temperature) 이상에서는 rutile 결정구조를 가지며, 전기적으로 도체에 가까워 저항이 낮으며, 광학적으로 적외선 영역에서 불투명한 특징을 가지고 있다. 이러한 이산화바나듐의 가역적인 상전이 현상을 이용하여 스마트 윈도우(smart window) 및 스위칭 소자 등에 응용하고자하는 연구가 오랫동안 진행되어왔다[1,2]. 스마트 윈도우는 여름철에 창문을 통해 외부에서 실내로 들어오는 적외선 영역의 빛을 차단시켜 실내의 온도 상승을 방지하여 냉방비를 줄일 수 있다[1]. 하지만 일반적인 VO_2 박막이나 벌크의 상전이 온도 (T_c)는 68 ºC로 상온보다 상대적으로 꽤 높은 온도에서 상전이가 일어나며, 이러한 상전이 온도는 실제로 스마트 윈도우에 적용하기에는 너무 높은 온도이다. 따라서 이산화바나듐의 상전이 온도를 낮추고자하는 많은 연구가 있었다[2-6].

이산화바나듐의 상전이 온도를 낮추고자하는 연구는 텅스텐(W)으로 도핑을 하거나[2, 3], 응력유도(stress-induced)에 의해 T_c를 조절하려는 시도가 있었으나[4, 5] 아직 만족스러운 결과를 얻지는 못하고 있다. 텅스텐 도핑의 경우, 상전이 온도를 낮출 수는 있었지만 상전이 현상이 비가역적으로 변하는 문제가 발생하였다[3]. 써모크로믹 소재인 VO_2 박막을 준비하는 대표적인 방법은 Pulsed Laser Deposition, sputtering 같은 물리기상 증착법과 Atomic Layer Deposition, Chemical Vapor Deposition법을 이용한 박막과 나노구조체 합성 등이 있다. sputter와 같은 물리기상 증착법은 손쉽게 VO_2 박막을 대면적으로 증착할 수 있어 일반적으로 널리 사용되고 있다. Hyeongkeun Kim 등의 보고에 의하면 스퍼터를 이용하여 그래핀 기판 위에 바나듐옥사이드 박막을 증착하여 VO_2/그래핀 복합체 구조의 thermochromic smart window를 제작하였고, solar lamp로 복사열을 인가하여 스마트 윈도우 내부의 실내 온도 변화를 측정하였다. 비록 VO_2/그래핀 복합체의 T_c는 63 ºC로 기존의 벌크에 비해 크게 낮지는 않았으나 스마트 윈도우가 적용된 실내 온도는 대조군과 비교하여 5.8 ºC가 낮게 유지되어 스마트 윈도우로의 적용가능성을 확인하였다[1]. 하지만 sputter를 이용하여 증착된 바나듐옥사이드의 박막은 VO_x 조성의 형태로 나타나며, 이러한 박막을 VO_2 조성으로 전환시키기 위해서는 매우 정교하고 시간소모가 큰 annealing 과정을 거쳐야하는 문제가 있다.

반면에 CVD을 이용한 나노구조체의 성장은 결정성이 상대적으로 우수하여 CVD를 이용한 바나듐옥사이드 합성 연구가 많이 진행되어 왔다. CVD를 이용한 VO_2 성장은 다양한 기판 위에서 시도되었는데, 실리콘(Si)기판[3, 5], 사파이어(Al_2O_3)기판[4], 쿼츠(SiO_2)기판[5], 실리콘나이트라이드(Si_3N_4) 기판[6, 7]등에서 모두 1차원 nanobeam 또는 nanowire가 성장되는 것으로 보고되었다. 특히 최근에 보고된 1차원 VO_2 nanowire의 경우, 직경이 작아질수록 T_c가 감소하여 100 nm의 직경을 갖는 1D VO_2 nanowire는 29 ºC에서 상전이가 일어남이 보고되었다[6]. 1차원 VO_2 nanobeam 또는 nanowire의 상전이 온도가 직경의 크기에 의존하여 감소하는 것은 스마트 윈도우나 스위칭 소자로의 응용에 대한 기대를 가져올법하다.

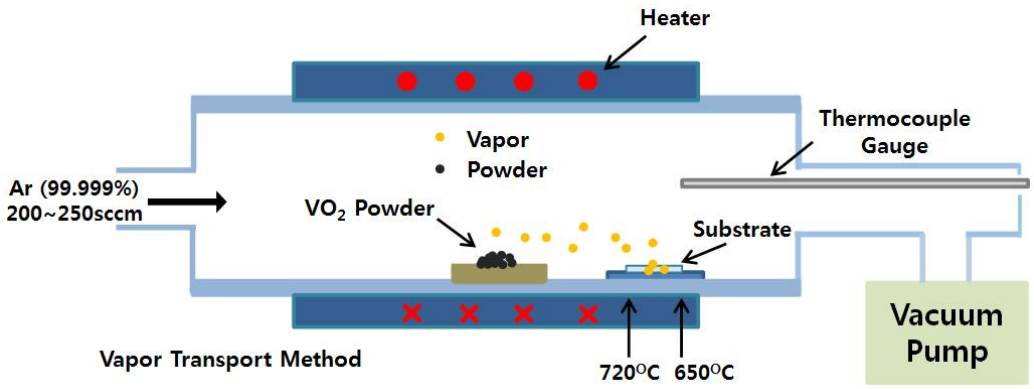


Fig. 1. Schematic diagram of the thermal CVD system.

하지만 기판 위에 균일한 형태로 넓은 면적에 걸쳐 수백 nm 크기의 nanowire를 균일하게 성장시키는 것은 매우 어려운 일이다. 따라서 넓은 표면적을 갖는 매우 얇은 나노박막 형태의 VO_2 소재의 합성이 가능하다면 Surface-Stress-Induced 효과에 기반하여 상전이 온도를 상온 부근으로 낮출 수 있을 것으로 기대할 수 있다.

따라서 본 연구에서는 thermal CVD 장비를 이용한 vapor transport method에 기반하여 그래핀 나노시트 위에 2차원 나노구조를 갖는 VO_2 소재의 성장에 대하여 연구하였다.

2. 실험방법

Fig. 1에 나타낸 바와 같이 1,000 ºC까지 가열할 수 있는 thermal CVD 장비를 이용하여 vapor transport 방법으로 1차원 또는 2차원 나노구조를 갖는 바나듐옥사이드 나노구조체 성장을 진행하였다. 기판은 1 cm × 1 cm 또는 2 cm × 2 cm 크기의 Si 웨이퍼(Si\SiO_2(300 nm)를 사용하였다. Si 웨이퍼 조각 기판은 아세톤, 에틸알코올, 탈이온수(DI water)에 각각 5분씩 초음파 세척한 후 N_2 gun으로 건조시켜 준비하였다. 준비된 Si 웨이퍼 조각 위에 스카치 테이프법(scotch-tape method)으로 HOPG (Highly Oriented Pyrolytic Graphite)로부터 기계적으로 박리된 그래핀 나노시트를 전사하였다. 전사된 그래핀 나노시트의 상태를 확인하기 위하여 우선 광학현미경으로 관찰하였고, 그래핀 나노시트의 층수 및 quality는 micro-Raman(inVia Qontor by RENISHAW)으로 확인하였다.

바나듐옥사이드 나노구조체의 성장 실험은 알루미나 도가니에 순도 99.9%의 vanadium(IV) oxide powder (SIGMA-ALDRICH)를 2g loading한 후 heater 중앙에 위치시키고, micro-Raman 분석으로 기판 상태를 확인한 그래핀 나노시트 기판을 기판 지지대 위에 Si 웨이퍼 기판과 동시에 loading한 다음, 로터리 펌프로 30분간 6.0 × 10^{-3} Torr 이하로 진공 분위기를 유지시킨 후, 고순도 Ar 가스(99.999%)를 흘려주면서 3차례 purging 절차를 거친다. 그 후에 일정한 flow rate(200 ~ 250 SCCM)로 Ar gas를 흘려주면서 furnace를 16.3 ºC/min의 비율로 가열하여 1시간 후 1000 ºC에 이르도록 하였고, Quartz Tube 내의 압력은 2.8 ~ 3.2 Torr로 유지시켰다. 바나듐옥사이드 나노구조체가 성장되는 기판의 온도는 650 ~ 720 ºC가 되도록 하였으며, 바나듐 옥사이드는 5시간동안 성장시켰다.

바나듐옥사이드 나노구조체의 성장 실험 후 표면 상태를 광학현미경으로 우선 관찰하여 바나듐옥사이드 성공적인 성장여부를 판단하였고, 보다 정확한 morphology는 FE-SEM(Sirion by FEI)으로 분석하였다. FE-SEM 분석에서 시료의 오염을 방지하기 위하여 conducting layer로 일반적으로 사용하는 Pt 박막 코팅을 생략하고 표면분석을 실시하였다.

3. 실험결과 및 고찰

vapor transport 방법으로 성장된 바나듐옥사이드 나노구조체의 FE-SEM 분석 결과를 Fig. 2에 나타내었다. 여러 연구그룹에서 이미 보고한 바와 같이 Si 기판 위에서는 1D 형태의 nanobeam이 성장되었다.

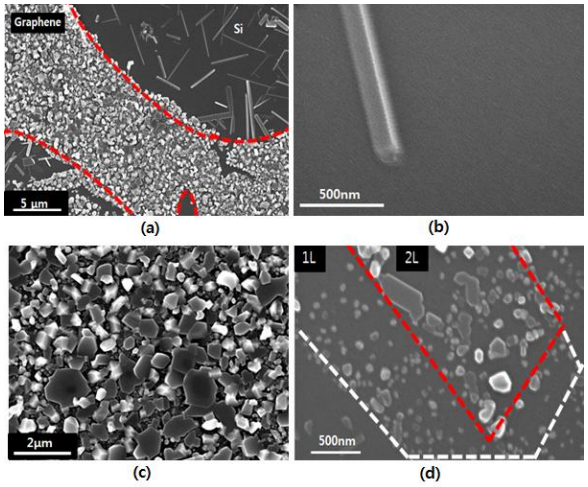


Fig. 2. SEM images of the as grown VO_2 by thermal CVD system. (a) As grown VO_2 shows different morphology 1D nanobeams on Si substrate, and 2D & 3D nanostructures on exfoliated graphene nanosheets (inside of red dashed lines). The growth temperature was 680 ºC. (b) 1D VO_2 nanobeam with rectangular cross section on Si wafer substrate at 710 ºC. (c) Most well grown 2D & 3D nanostructured VO_2 on exfoliated graphene nanosheet at 655 ºC. (d) As grown VO_2 nanostructures on mono-layer graphene nanosheet (area of between red and white dashed line) which have low growth rate, and on bi-layer graphene nanosheet (area of inside of red dashed line) which have relatively high growth rate.

Fig. 2의 (a)를 보면 그래핀 나노시트 기판 위에서는 2D & 3D 형태의 나노구조체가 성장되었고, 그래핀 나노시트가 전사되지 않은 Si 웨이퍼 위에서는 1D nanobeam이 성장되었다. 빨간색 점선 내부가 graphene 나노시트 기판 위에 성장된 2D & 3D VO_2 구조체이며 그 바깥은 Si 기판으로 VO_2 nanobeam이 드문드문 합성되어 있다. 이때의 성장 온도는 680 ℃이다. Fig. 2 (b)는 710 ℃에서 Si 웨이퍼 기판 위에 성장된 1D VO_2 nanobeam의 고배율 이미지이다. 시료의 오염을 방지하기 위하여 conducting layer인 Pt 박막을 코팅하지 않았기에 charging 현상 때문에 이미지가 약간 흐리지만 사각형의 단면을 갖는 nanobeam임을 확인할 수 있다[7]. Fig. 2 (c)는 그래핀 나노시트 기판 위에 성장된 바나듐 옥사이드 나노구조체의 고배율 이미지인데, 부분적으로 잘 성장된 2차원 구조의 바나듐 옥사이드와 약간은 무작위적인 3D 구조를 갖는 바나듐옥사이드가 혼재하여 성장된 것을 확인할 수 있다. 이때 바나듐옥사이드의 성장 온도는 655 ℃인데, Si 기판 위에서 성장된 1D nanobeam에 비하여 매우 높은 밀도로 합성되는 것을 확인할 수 있다. 이때 사용된 그래핀 나노시트 기판은 Fig. 3의 (b)에 나타낸 것과 같은 4층 이상의 multi-layer 그래핀 나노시트 기판이었다. Fig. 2의 (d)는 그래핀 나노시트가 매우 얇은 mono/bi-layer 그래핀 나노시트 기판 위에서 성장된 바나듐옥사이드의 모습이다. multi-layered 그래핀 나노시트에서와는 다소 다른 모습이며, 특히 mono-layer 영역과 bi-layer 영역에서의 성장 모습이 다른 것을 확인할 수 있다. 이것은 그래핀 나노시트의 표면 에너지와 관련이 있는 것으로 추가적인 연구가 진행 중에 있다.

성장된 바나듐옥사이드 나노구조체의 결정학적 특성을 분석하기 위하여 micro-Raman 분석을 실시하였고, 그 결과를 Fig. 3에 나타내었다. Fig. 3 (a)는 Si 기판의 Raman spectra이며, 파수 520 cm^{-1}에서 main peak이 나타났다[8]. Fig. 3 (b)는 그래핀 나노시트 기판의 Raman spectra이다. 여기에서 2D/G의 비에 의해서 그래핀 나노시트의 층수를 확인할 수 있는데, Fig. 2 (a)와 (c) 실험에 사용된 기판은 Fig. 3 (b)처럼 분석되는 4층 이상의 multi-layer 그래핀 나노시트였다[9]. 바나듐옥사이드 나노구조체의 성장 후에 국부적인 위치에 대하여 micro-Raman 분석을 실시하였는데, Fig. 3 (c)는 1차원 나노구조를 갖는 nanobeam에 대하여 분석한 Raman spectra이다. 파수 520 cm^{-1}의 Si peak가 가장 강하게 나타나고, 1D VO_2 peak는 매우 약하게 나타난다. 1D VO_2 nanobeam은 기판 위에 듬성듬성 성장되었기에 Si 기판의 Raman peak에 비해 상대적으로 약하게 검출되지만, peak는 각각 파수 193, 224, 304, 337, 389, 615 cm^{-1}에서 나타나 VO_2 phase를 갖는 것을 확인할 수 있다[10].

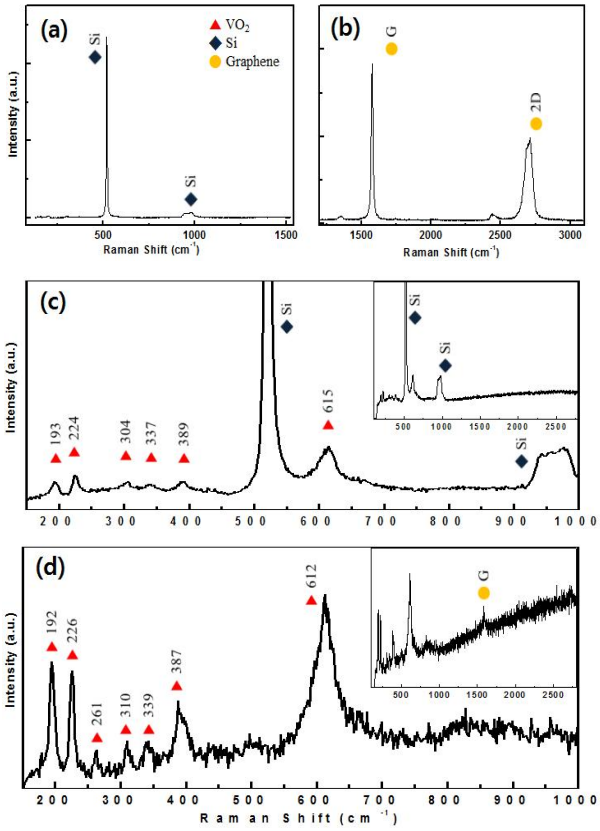


Fig. 3. Raman spectra of (a) bare Si wafer(Si\SiO_2(300 nm)/Si) and (b) exfoliated graphene nanosheet on Si wafer. Si peaks show at wavenumber 520 cm^{-1} and around 939~989 cm^{-1}. Graphene peaks show at wavenumber 1575 cm^{-1} (G peak) and 2707 cm^{-1} (2D peak). The ratio of 2D/G is around 0.5. The exfoliated graphene nanosheet are multi-layered graphene(more than 4 layers). Raman spectra of as grown (c) 1D nanobeam VO_2 and (d) 2D & 3D VO_2 nanostructures. The insets of (c) and (d) are full range Raman spectra. The red triangle symbol denotes VO_2 phase peaks, and yellow circle symbol denotes graphene peaks. According to the Raman analysis, the as grown 1D nanobeam vanadium oxide, and 2D & 3D nanostructrured vanadium oxide have VO_2 phase.

반면에 Fig. 3 (d)를 보면 Fig 2. (c)처럼 조밀하게 성장된 영역에서의 Raman spectra이므로 peak는 각각 파수 192, 226, 261, 310, 339, 387, 612 cm^{-1}로 미소하게 shift되었지만, 신호의 세기는 강하게 나타나고, 파수 1530 cm^{-1} 부근에서 기판으로 사용된 그래핀 나노시트의 G peak도 미세하게 나타난다. 하지만 2D VO_2가 조밀하고 두껍게 성장하여 그래핀 나노시트 아래층의 Si 기판 peak는 관찰할 수 없다.

2D VO_2의 기판으로 사용된 그래핀 나노시트의 층수 및 품질의 영향을 고찰하기 위하여 mono-layer 그래핀 나노시트 및 bi-layer 그래핀 나노시트 위에서 성장된 VO_2를 분석한 결과를 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 4의 (a), (b)와 (c), (d)는 각각 mono-layer 그래핀 나노시트와 bi-layer 그래핀 나노시트에 대하여 VO_2 성장실험 전후의 Raman 분석결과이다. Fig. 4 (e)는 분석에 사용된 시료의 FE-SEM 이미지인데, 빨간색 점선 안쪽 영역은 bi-layer 그래핀 나노시트 위에 성장된 VO_2이고, 빨간색 점선과 흰색 점선 사이의 영역은 mono-layer 그래핀 나노시트 위에 성장된 VO_2의 모습이다. Fig. 4 (a)에서 그래핀의 G peak과 2D peak의 세기를 비교하면 2D/G비가 약 3.5를 나타내어, 실험 전 해당 영역의 그래핀 나노시트는 고품질의 mono-layer 그래핀인 것을 확인할 수 있고, Fig. 4 (c)에서 2D/G peak의 비가 약 1인 것을 보면 고품질의 bi-layer 그래핀 나노시트인 것을 확인할 수 있다. Fig. 4 (b)에서 바나듐옥사이드의 성장 후에는 파수 196, 224cm^{-1} 에서 매우 약한 VO_2 peak가 측정되므로 mono-layer 그래핀 나노시트 기판 위에서는 VO_2의 합성속도가 매우 느려 거의 합성되지 않았음을 확인할 수 있다. 또한 Fig. 4 (d)에서도 비슷하여 bi-layer 그래핀 나노시트 기판 위에서도 mono-layer의 경우보다는 좀 더 강한 세기를 갖지만 여전히 약한 산란이 일어나 VO_2의 성장 속도가 4층 이상의 multi-layer 그래핀 나노시트 기판에서보다 크지 않음을 확인할 수 있다. 이러한 양상은 그래핀 나노시트의 층수에 따라 그래핀 나노시트 기판의 표면에너지가 다르고, 이러한 효과가 vanadium oxide vapor에 각각 다른 촉매효과로 작용하는 것으로 추정된다. 보다 자세한 성장 메커니즘에 대한 연구는 진행 중에 있다.

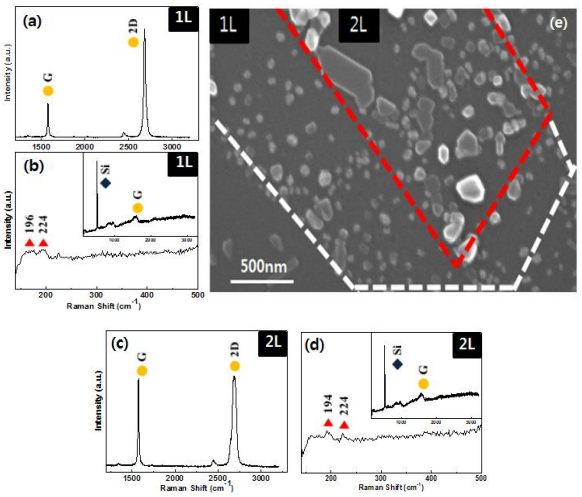


Fig. 4. Raman spectra of few layered exfoliated graphene nanosheet before VO_2 growth (a, c), and after VO_2 growth (b, d). The insets of (b) and (d) are full range Raman spectra. The SEM image (e) of as grown 2D & 3D VO_2 nanostructures on few layered graphene nanosheet substrate. (a) The ratio of 2D/G of Raman spectra is 3.5 which imply high quality mono-layer graphene. (b) Very weak and few signals of VO_2 were detected due to the rare VO_2 nanostructures distribution. (c) The Raman spectra of bare bi-layer graphene which exhibits almost the same intensities between G peak and 2D peak. (d) Relatively stronger VO_2 peaks' intensities than the case of monolayer graphene were found due to relatively high growth rate of VO_2 nanostructures.

4. 결론

본 연구에서는 금속-절연체 상전이 특성을 나타내는 써모크로믹 소재인 이산화바나듐 나노구조체를 thermal CVD를 이용하여 기판 위에 직접 성장시키는 연구를 진행하였으며, 다음과 같은 결론을 내릴 수 있다.

1. 그래핀 나노시트 기판의 유무에 따라 바나듐 옥사이드는 동일한 성장조건에서도 Si기판 위에서는 1D nanobeam VO_2로 성장되었고, graphene nanosheet 위에서는 2D & 3D nanostructure 형태의 VO_2로 성장되었다.
2. 그래핀 나노시트가 전사되어 있는 Si 기판 위에서 그래핀 나노시트의 층수에 따라 동일한 성장조건에서도 다른 형태의 VO_2 nanostructure가 성장되

었다. 특히 그래핀 나노시트의 층수에 따른 표면에너지의 차이에 의해 VO_2의 성장속도가 다르고, 그 효과로 인하여 bi-layer graphene nanosheet 위에서는 2D 나노구조의 VO_2가 주로 성장되었고, 4층 이상의 multi-layer graphene nanosheet 위에서는 매우 조밀한 형태의 2D & 3D 나노구조의 VO_2가 성장되는 것이 관찰되었다.

3. 따라서 그래핀 나노시트 기판의 층수와 품질을 정밀하게 제어할 수 있다면 매우 얇은 2D 나노구조를 갖는 VO_2의 성장이 가능할 것으로 예상되어지며, 매우 얇은 2D 나노구조의 VO_2는 Surface-Stress-Induced 효과에 기반하여 상온근처에서 상전이 현상이 일어나는 기능성 thermochromic VO_2의 합성이 가능할 것으로 기대된다.

References

[1] H. Kim, Y. Kim, K. S. Kim, H. Y. Jeong, A. Jang, S. H. Han, D. H. Yoon, K. S. Suh, H. S. Shin, T. Y. Kim, and W. S. Yang, "Flexible Thermochromic Window Based on Hybridized VO_2/Graphene", ACS Nano, vol. 7, pp. 5769-5776, 2013.
DOI: http://dx.doi.org/10.1021/nn400358x

[2] W. Burkhardt, T. Christmann, B. K. Meyer, W. Niessner, D. Schalch and A. Schamann, "W- and F-doped VO_2 films studied by photoelectron spectroscopy Thin Solid Films, vol. 345, pp. 229-235, 1999.
DOI: http://dx.doi.org/10.1016/S0040-6090(98)01406-0

[3] M. Mao, W. Huang, Y. Zhang, J. Yan, Y. Luo, Q. Shi, and J. Cai, "Study on Phase Transition Property of Tungsten-doped Vanadium Dioxide Thin Film at Tetrahertz Range" Journal of Inorganic Materials, vol. 27, pp. 892-896, 2012.
DOI: http://dx.doi.org/10.3724/SP.J.1077.2012.12131

[4] J. I. Sohn, H. J. Joo, D. Ahn, H. H. Lee, A. E. Porter, K. Kim, D. J. Kang, and M. E. Welland, “Surface-Stress-Induced Mott Transition and Nature of Associated Spatial Phase Transition in Single Crystalline VO_2 Nanowires”, Nano Letters, vol. 9, pp. 3392-3397, 2009.
DOI: http://dx.doi.org/10.1021/nl900841k

[5] A. Tselev, I. A. Luk'yanchuk, I. N. Ivanov, J. D. Budai, J. Z. Tischler, E. Strelcov, A. Kolmakov, and S. V. Kalinin, "Symmertry Relationship and Strain-Induced Transitions between Insulating M1 and M2 and Metallic R Phases of Vanadium Dioxide" Nano Letters, vol. 10, pp. 4409-4416, 2010.
DOI: http://dx.doi.org/10.1021/nl1020443

[6] H. Liu, J. Lu, M. Zheng, S. H. Tang, C. H. Sow, X. Zhang, and L. Ke, "Size effects on metal-insulator phase transition in individual vanadium dioxide nanowires", Optics Express, vol. 22, pp. 30748-30755, 2014.
DOI: http://dx.doi.org/10.1364/OE.22.030748

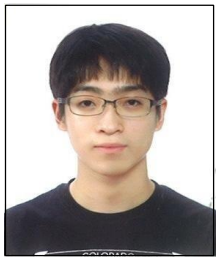
[7] B. S. Guiton, Q. Gu, A. L. Prieto, M. S. Gudiksen, and H. Park, "Single-Crystalline Vanadium Dioxide Nanowires with Rectangular Cross Sections", Journal of the American Chemical Society, vol. 127, pp 498-499, 2005.
DOI: http://dx.doi.org/10.1021/ja045976g

[8] J. H. Parker, Jr., D. W. Feldman, and M. Ashkin, "Raman Scattering by Silicon and Germanium", Physical Review, vol. 155, p. 712, 1967.
DOI: http://dx.doi.org/10.1103/PhysRev.155.712

[9] A. C. Ferrari, J. C. Meyer, V. Scardaci, C. Casiraghi, M. Lazzeri, F. Mauri, S. Piscanec, D. Jiang, K. S. Novoselov, S. Roth, and A. K. Geim, "Raman Spectrum of Graphene and Graphene layers", Physical Review, vol. 97, p. 187401, 2006.
DOI: http://dx.doi.org/10.1103/physrevlett.97.187401

[10] G. I. Petrov, V. V. Yakoviev, and J. Squier, "Raman microscopy analysis of phase transformation mechanisms in vanadium dioxide", Applied Physics Letters, vol. 81, pp. 1023-1025, 2002.
DOI: http://dx.doi.org/10.1063/1.1496506

오 수 아(Su-Ar Oh) [준회원]



- 2013년 3월 : 목원대학교 신소재화학공학과 입학
- 2016년 3월 ~ 현재 : 목원대학교 신소재화학공학과 학부 4학년

<관심분야>
에너지 관련 소재, 고체물리, 재료공학, 상변태학

김 기 출(Ki-Chul Kim) [종신회원]

- 1996년 2월 : 아주대학교 물리학과 (이학석사)
- 2002년 2월 : 아주대학교 물리학과 (이학박사)
- 2002년 4월 ~ 2006년 3월 : 한국전자통신연구원 선임연구원
- 2008년 3월 ~ 현재 : 목원대학교 신소재화학공학과 교수

<관심분야>
기능성 나노소재, 에너지관련 소재, 기능성 박막