

VO₂ 박막에서의 광전 변환 특성 연구

정주호 · 강만일 · 김석원*

울산대학교 물리학과, 울산 680-749

(2013년 6월 16일 받음, 2013년 7월 5일 수정, 2013년 7월 8일 확정)

본 연구에서는 sol-gel법을 이용해 제작된 VO₂ 박막의 광전변환 특성을 연구하기 위해 광 조사 유무에 의해 생성되는 전류를 bias voltage에 따라 온도별로 측정하였다. 그 결과, 광 조사 유무에 따라 박막에서 생성되는 전류가 변화되는 것을 알 수 있었으며, bias voltage가 증가할수록 전류가 일정하게 늘어나는 것을 알 수 있었다. 특히, 광에 의해 생성되는 전류는 VO₂에서의 MIT 온도보다 낮은 50°C에서 최대였다. 이러한 결과는 VO₂에서 photo-voltaic 효과가 발생함을 의미하며, 따라서 VO₂ 박막을 광전변환 소자로 응용할 수 있을 것으로 기대된다.

주제어 : VO₂, 광기전력, 태양 에너지, 금속-절연체 전이

I. 서 론

신흥 개발국의 급속한 경제 발전과 정보 전자 산업의 발달로 인해 에너지 수요가 급증하고 있다. 현재까지 인류는 화석연료를 주 에너지원으로 사용해왔으나 화석연료의 매장량은 급격하게 고갈되어 매장량에 한계를 보이고 있으며, 연소를 통한 과정에서 이산화탄소나 아황산가스를 발생시켜 환경오염 등의 2차적인 문제까지 발생하고 있다 [1]. 따라서 이러한 문제를 해결 할 수 있는 신재생 에너지의 개발이 시급하다. 신재생 에너지란 재생 가능한 에너지를 변환시켜 이용하는 새로운 형태의 에너지원으로써 지속 가능한 에너지 생산이 특징이다 [2]. 이러한 신재생 에너지 중 가장 주목 받는 것은 바로 태양 에너지를 이용하는 방법이다.

태양 에너지는 청정한 무한에너지로서 에너지 자원의 소비 없이 에너지를 얻을 수 있으며, 유지 및 보수가 용이하고, 무인화 시킬 수 있다는 장점이 있다. 또한 PV모듈의 구조로 인해 양산성이 풍부하다는 특징이 있다 [3-7]. 하지만 기술적으로 태양에너지가 경제성을 가지기 위해서는 현재보다 최소 6배 이상 값싸거나 효율이 높아야 하는데 기존 결정질 실리콘 태양전지로는 한계가 있는 것이 사실이다 [8]. 그러므로 새로운 소재와 구조를 이용한 저가, 고효율 태양전지의 개발이 요구되고 있으며, 이로 인한 저가의 박막 제조기술 개발이 필수적이다. 또한, 태양 전지의 경우 전하 생성률을 높이기 위해 빛의 반사와 물질을 투과하는

부분은 줄이고, 흡수를 최대한 높여야 한다 [9].

VO₂ 박막의 경우, 0.6 eV의 밴드갭 에너지($\lambda=2 \mu\text{m}$ 이하)를 가지는 반도체 물질로서, 전 가시광 영역에서 광을 흡수하는 넓은 흡수대 영역을 가지는 장점이 있다 [10-14]. 또한, 기존의 단일 접합 태양전지의 경우 빛에 의해 여기된 전자들이 열로 손실되는 단점이 있으나, VO₂ 박막을 통해 태양전지를 제작할 경우 금속 절연체 전이특성(MIT; metal insulator transition) [15,16]으로 인해 열에 의한 전하 농도가 급증한다는 장점이 있어 광전 변환 소자로서의 가치가 충분 할 것으로 보인다. 하지만 VO₂ 박막의 광학적 전기적 특성에 비해 photo-voltaic 효과에 대한 연구는 부족한 것이 사실이며, VO₂ 박막의 photo-voltaic 효과에 대해 연구할 경우 현재 희소성 있는 박막형 태양전지에 비해 저가의 광전 변환 소자 개발이 가능할 것으로 예상된다.

본 연구에서는 VO₂ 박막의 광전 변환 특성을 조사하기 위해 sol-gel 법을 이용하여 박막을 제작하였다. 온도와 바이어스 전압에 따른 박막에서의 전류 변화를 측정 하였으며, 또한, 광 조사 유무에 따른 전류 변화를 측정하여 VO₂ 박막에서의 photo-voltaic 특성을 분석하였다.

II. 실험방법

본 연구에서는 VO (OC₃H₇) (Stream Ltd, USA)을 iso-

* [전자우편] sokkim@ulsan.ac.kr

propanol 용액에 용해시켜 0.12 M의 용액으로 만든 뒤 sol-gel 법으로 VO₂ 박막을 제작하였다. 본 연구에 사용된 기판은 Pt/TiO₂/SiO₂/Si 기판으로 각 층의 높이는 Pt가 150 nm, TiO₂가 20 nm, SiO₂가 300 nm이며 Si의 경우 P-type(111)의 4 inch 기판을 사용하였다. 또한 구조적 특성을 확인하기 위한 XRD 측정을 위해 Al₂O₃ 기판을 사용하였다. 준비된 2가지 기판을 4등분한 뒤 20초 동안 2,000 rpm으로 spin coating하고, hot plate 위에서 3분 동안 250°C에서 건조시키는 과정을 총 10회 반복한 뒤, 2번의 열처리를 통해 VO₂ 박막을 제작하였다.

열처리 조건은 먼저 대기압에서 420°C로 60분 동안 열처리 하였고, 그 뒤에 산소 분위기에서 550°C로 60분 더 열처리 해주었다. 산소 분위기에서 열처리 할 때의 초기 진공도는 5×10⁻⁶ torr였고, 50 sccm의 산소 가스를 지속적으로 주입하면서 진공도 3×10⁻² torr에서 진행하였다. Al₂O₃ 기판 위에 제작된 시료의 결정구조를 조사하기 위해 XRD (D/MAX-Rc, Rigaku)를 사용하였으며, 회절 패턴은 30 kV, 60 mA, Cu K_α (1.5406 Å)의 복사로부터 얻었다. 회절패턴은 2θ범으로 15~60°까지 분당 4°속도에서 0.02° 간격으로 측정하였다.

실리콘 기판 위에 제작된 VO₂ 박막은 Fig. 1과 같이 양단에 silver wire를 접착시켜 source meter (2400, KEITHLEY)를 연결하여 한쪽으로는 바이어스 전압을 인가하고 다른 한쪽으로는 생성되는 전류를 측정하였다. 이때 상부 전극에서는 + 전압을 인가하였고, 하부 전극에서는 - 전압을 인가하였으며, 전류 측정 시에도 전압과 동일한 방향으로 상부 전극에서는 + 전류를, 하부 전극에서는 - 전류를 측정하였다.

Bias voltage는 0 V에서 +5 V까지 1 V 단위로 인가하였으며 이때 온도에 따른 전류 변화를 측정하기 위해 온도 조절기를 이용하여 각 bias voltage를 인가할 때 마다 박막의 온도를 상온에서 80°C까지 정해진 간격으로 조절하여 온도

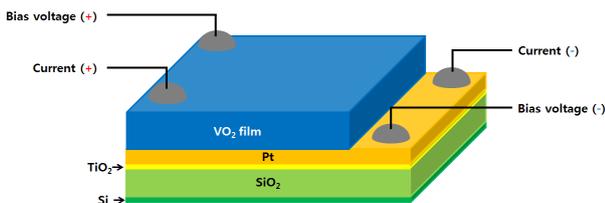


Figure 1. Schematic of sample structure.

와 광조사 유무에 따른 전류 값을 비교하였다. 본 연구에서는 Xenon lamp (LS Series light source, ABET Technology)를 광원으로 사용하였으며, 광을 박막에 조사하기 위해 mirror와 lense를 이용하였다. 이때의 빔 사이즈는 4 mm로 하였고, 박막에 조사되는 광 세기는 30 mW/cm²이었다. 조사된 광이 박막에 접촉된 Silver wire에 닿지 않도록 주의하여 온전히 박막에 대한 광전 변환 효과만을 측정하고자 하였다. Fig. 2는 실험 장치도이며 측정되는 데이터들은 source meter와 연결된 컴퓨터의 LabView 프로그램을 통해 수집하였다. 저장된 데이터는 Origin 프로그램을 통해 그래프로 나타내었다.

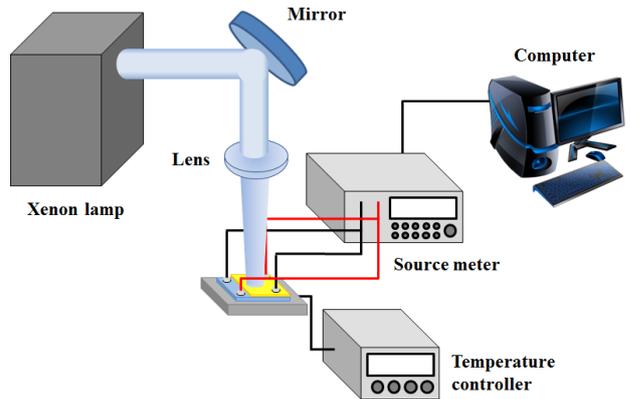


Figure 2. Experimental setup.

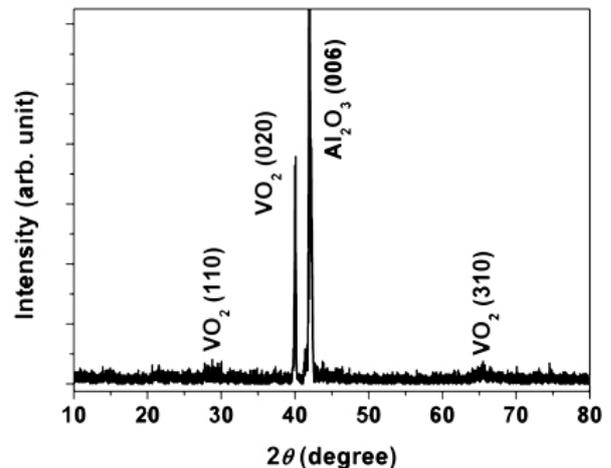


Figure 3. XRD pattern of VO₂ film.

III. 결과 및 고찰

Fig. 3은 Al₂O₃ 기판 위에서 제작된 VO₂의 구조적 특성을 확인하기 위한 XRD 패턴이다. 후열처리를 통해 성장된 VO₂ 박막의 XRD 패턴을 확인한 결과 40°부근에서 VO₂ (020)면에 대응하는 강한 피크가 나왔으며, (110)과 (310)면에서도 약한 VO₂ 특성 피크를 확인할 수 있었다. 즉, sol-gel 법을 이용해 결정질 상태의 VO₂ 박막이 성장됨을 알 수 있었다.

Fig. 4는 바이어스 전압이 0 V일 때, 광 조사 유무에 따라 측정된 전류의 값을 그래프로 나타낸 것이다. 그 차이 값은 별도로 그래프 안에 그려 넣었다. 광을 조사하지 않았을 때 전이온도인 68°C 근처에서 전류가 급격하게 생성되는 것을 볼 수 있으며, 광을 조사하였을 때는 오히려 50°C 근처에서 전류가 급격하게 생성되는 것을 볼 수가 있다. 즉, VO₂ 박막의 photo-voltaic 효과로 인해 전류가 생성이 되었으며, 전이온도를 지나면서 current jump가 다시 일어난 것으로 해석된다.

Fig. 5(a)는 광을 조사하지 않았을 때 bias voltage에 따른 전류량을 측정된 것이다. Bias voltage가 증가할수록 전류가 더 많이 생성되는 것을 볼 수 있으며 증가량 또한 인가되는 전압에 따라 일정하게 증가하는 것을 볼 수 있다. Fig. 5(b)는 광을 조사했을 때 bias voltage에 따른 전류량을 측정된 것이다. 광을 조사하지 않았을 때와 마찬가지로 bias voltage가 증가할수록 전류가 더 많이 생성되었다. 광을 조사한 경우에도 인가되는 전압에 따라 일정하게 전류

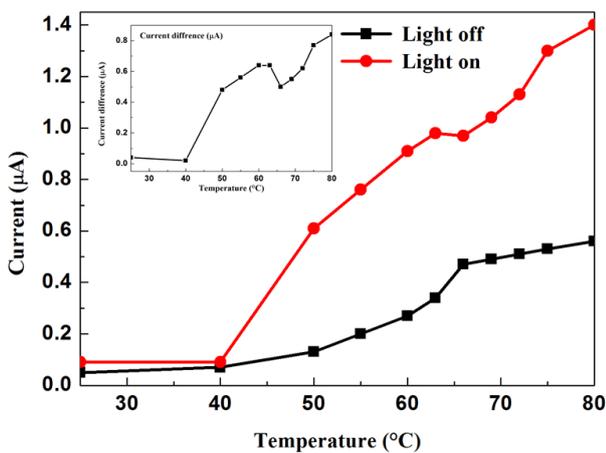


Figure 4. Current as a function of temperature with and without light (non bias voltage).

량이 증가하는 것을 알 수 있었다. 즉, VO₂ 박막에서의 photo-voltaic 효과는 같은 온도에서 bias voltage가 증가할수록 점차적으로 증가하며, 이것은 VO₂ 박막의 MIT 특성에 의한 전류량 증가보다 더 많은 것을 알 수 있다. Fig. 6은 오로지 광에 의해서 생성되는 전류량을 알아보기 위해 광을 조사할 때 측정된 전류량과 광을 조사하지 않을 때 측정된 전류량을 비교한 그래프이다. 인가되는 전압에 따라 광에 의해 생성되는 전류량이 커졌으며, 특히 bias voltage가 높을수록 50°C에서 생성되는 전류량이 가장 컸다. 이는 전압을 인가함에 따라 광에 의해서 생성되는 전류량이 전이 온도 부근인 68°C에서 생성되는 전류량보다 크다는 것을 의미한다.

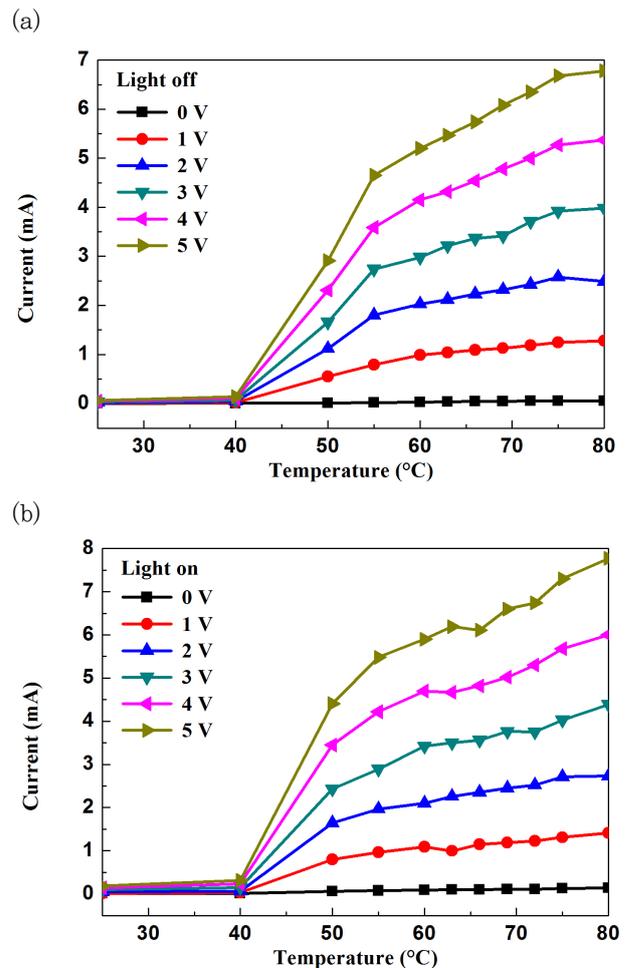


Figure 5. Current as a functions of temperature at several bias voltage; (a) light-off and (b) light on.

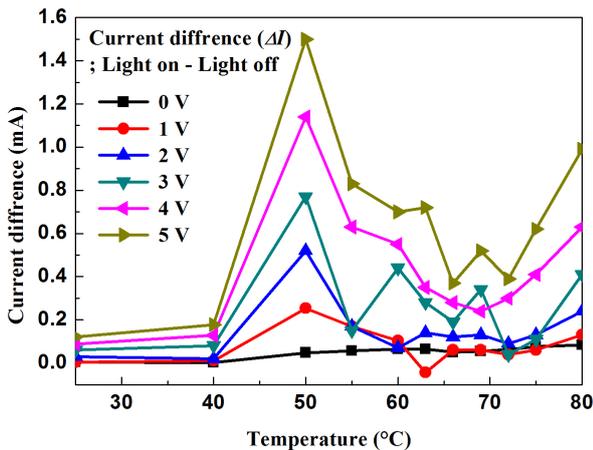


Figure 6. Current difference as a function of temperature between light on and off with bias voltages.

IV. 결 론

본 연구에서는 sol-gel법을 이용해 제작된 VO₂ 박막의 광전변환 특성을 연구하기 위해 광 조사 유무에 의해 생성되는 전류를 bias voltage에 따라 온도별로 측정하였다. 그 결과, bias voltage가 증가할수록 전류가 일정하게 늘어나며, 광 조사 유무에 따른 전류 값의 변화 또한 늘어나는 것을 알 수 있었다. 특히, 광에 의해 생성되는 전류량이 VO₂ 박막의 MIT 특성에 의해 생성되는 전류보다 월등히 크다는 것을 알 수 있었다. 이러한 결과로 볼 때, VO₂ 박막을 광전변환 소자로의 활용이 가능할 것으로 기대된다.

감사의 글

이 논문은 2011년 한국연구재단의 대학중점연구소 지원사업(2012-0598) 및 울산광역시와 교육과학기술부에 의해 투자된 지방과학연구단지 연구개발의 지원으로 수행된 연구임.

References

- [1] P. Droege, *Technology & Society* **22**, 87 (2002).
- [2] T. U. Jung and J. Y. Kim, *KIEE* **24**, 105 (2010).
- [3] M. A. Green, A. W. Blakers, J. Zhao, A. M. Milne, A. Wang, and X. Dai, *IEEE Trans. Electron Devices* **ED 37**, 331 (1990).
- [4] J. Zhao, A. Wang, M. Taouk, S. R. Wenham, M. A. Green, and D. L. King, *IEEE Electron Devices Letters* **14**, 539 (1993).
- [5] J. Knobloch, S. W. Glunz, D. Biro, W. Warta, E. Shaffer, and W. Wettling, *Proceedings of the 25th IEEE PV specialists conference*, 405 (1996).
- [6] A. Wang, J. Zhao, and M. A. Green, *Appl. Phys. Lett.* **57**, 602 (1990).
- [7] M. Taguchi, K. Kawamoto, T. Baba, H. Sakata, M. Morizane, K. Uchihashi, N. Nakamura, S. Kiyama, and O. Oota, *Progress in Photovoltaics* **8**, 503 (2002).
- [8] S. H. Park and J. H. Lyou, *J. Korean Vac. Soc.* **21**, 219 (2012).
- [9] H. W. Shin, J. C. Shin, H. J. Kim, S. Kim, and J. W. Choe, *J. Korean Vac. Soc.* **22**, 150 (2013).
- [10] Rella R, Siciliano P, Cricenti A, Generosi R, Girasole M, and Anderle M, *Thin Solid Films* **349**, 254 (1999).
- [11] G. T. Kim, J. Muster, V. Kristic, J. G. Park, Y. W. Park, S. Roth, and M. Burghard, *Appl. Phys. Lett.* **76**, 1875 (2000).
- [12] S. Surnev, M. G. Ramsey, and F. P. Netzer, *Prog. Surf. Sci.* **73**, 117 (2003).
- [13] Q. Su, W. Lan, Y. Y. Wang, and X. Q. Liu, *Appl. Surf. Sci.* **255**, 4177 (2009).
- [14] C. W. Zou, X. D. Yan, D. A. Patterson, E. A. C. Emanuelsson, J. M. Bian, and W. Gao, *Cryst Eng. Comm.* **12**, 691 (2010).
- [15] P. Baum, D. S. Yang, and A. H. Zewail, *Science* **318**, 788 (2007).
- [16] T. Driscoll, H. T. Kim, B. G. Chae, B. J. Kim, Y. W. Lee, N. M. Jokerst, S. Palit, D. R. Smith, M. Di Ventra, and D. N. Basov, *Science* **325**, 1518 (2009).

A Study of Photo-voltaic Property in VO₂ Film

Juho Jeong, Manil Kang, and Sok Won Kim*

Department of Physics, University of Ulsan, Ulsan 680-749

(Received June 16, 2013, Revised July 5, 2013, Accepted July 8, 2013)

In order to investigate the photo-electric property in VO₂ film grown by a sol-gel method, the currents generated by the light irradiation and nonirradiation were measured as functions of the bias voltage and the temperature. From the result, the generated current in the film changed with the light irradiation and nonirradiation, and it gradually increased with the bias voltage. In particular, the maximum current was generated at 50°C under the light irradiation; the temperature is lower comparing the MIT (metal-insulator transition) temperature in VO₂. This result indicates that VO₂ shows the photo-voltaic effect, and so that, it is expected that the VO₂ film is applied for a photo-voltaic device.

Keywords : VO₂, Photo-voltaic, Solar energy, Metal-insulator transition

* [E-mail] sokkim@ulsan.ac.kr