

Citrate 농도에 따른 수용액 화학조 증착 ZnO 성장 및 ZnO 박막의 Cu(In,Ga)Se₂ 태양전지 응용

조경수¹ · 장현준² · 오재영² · 김재우² · 이준수² · 최예솔² · 홍기하² · 정중희^{1,2†}

¹한밭대학교 공과대학 소재시스템공학과, ²한밭대학교 공과대학 신소재공학과

Effect of the Concentration of Citrate on the Growth of Aqueous Chemical Bath Deposited ZnO and Application of the Film to Cu(In,Ga)Se₂ Solar Cells

Kyung Soo Cho¹, Hyunjun Jang², Jae-Young Oh², Jae Woo Kim², Jun Su Lee²,
Yesol Choi², Ki-Ha Hong² and Choong-Heui Chung^{1,2†}

¹Department of Materials and Manufacturing Engineering, Hanbat National University,
Daejeon 34158, Republic of Korea

²Department of Materials Science and Engineering, Hanbat National University, Daejeon 34158, Republic of Korea

(Received March 13, 2020 : Revised March 31, 2020 : Accepted April 1, 2020)

Abstract ZnO thin films are of considerable interest because they can be customized by various coating technologies to have high electrical conductivity and high visible light transmittance. Therefore, ZnO thin films can be applied to various optoelectronic device applications such as transparent conducting thin films, solar cells and displays. In this study, ZnO rod and thin films are fabricated using aqueous chemical bath deposition (CBD), which is a low-cost method at low temperatures, and environmentally friendly. To investigate the structural, electrical and optical properties of ZnO for the presence of citrate ion, which can significantly affect crystal form of ZnO, various amounts of the citrate ion are added to the aqueous CBD ZnO reaction bath. As a result, ZnO crystals show a nanorod form without citrate, but a continuous thin film when citrate is above a certain concentration. In addition, as the citrate concentration increases, the electrical conductivity of the ZnO thin films increases, and is almost unchanged above a certain citrate concentration. Cu(In,Ga)Se₂ (CIGS) solar cell substrates are used to evaluate whether aqueous CBD ZnO thin films can be applicable to real devices. The performance of aqueous CBD ZnO thin films shows performance similar to that of a sputter-deposited ZnO:Al thin film as top transparent electrodes of CIGS solar cells.

Key words ZnO, chemical bath deposition, Cu(In,Ga)Se₂, solar cell.

1. 서 론

ZnO 박막은 다양한 코팅 기술에 의해 높은 전기 전도성과 높은 가시광선 투과율을 가질 수 있기 때문에 다양한 광전자 소자 응용에 사용될 수 있다.¹⁻⁴⁾ 고성능의 ZnO 박막을 제조하기 위해서 다양한 화학적 및 물리적인 증착 방법들이 적용되어왔다. 스퍼터링,⁵⁾ 유기 금속

화학 증착(metal organic chemical vapor deposition),⁶⁾ 펄스 레이저 증착(pulsed laser deposition)⁷⁾ 등의 기상 증착 공정을 통해 고품질의 ZnO 박막을 제조할 수 있다.⁸⁻¹⁰⁾ 그러나, 기상 증착 공정은 고가의 비용과 고온을 필요로 하는 단점이 있다. ZnO 박막을 광전자 장치의 구성요소로서 널리 이용하기 위해서는 저온 및 저가 공정을 필요로 한다. 예를 들어, ZnO 박막이 Cu(In,Ga)Se₂

[†]Corresponding author

E-Mail : choong@hanbat.ac.kr (C.-H. Chung, Hanbat Nat'l Univ.)

© Materials Research Society of Korea, All rights reserved.

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

(CIGS) 박막 태양전지의 상부 투명 전도성 전극으로 사용될 때, CIGS/CdS 접합을 가진 시편을 150 °C 이상으로 가열하면 이 p-n의 열화가 발생하기 때문에¹¹⁾ CIGS/CdS p-n 접합 후 형성하는 ZnO 박막의 공정 온도는 150 °C 미만으로 유지되어야 한다.

수용액 기반 화학 조 증착법(chemical bath deposition, CBD)은¹²⁾ 공정 비용이 적게 들고 저온에서 우수한 특성의 ZnO 박막을 제조할 수 있는 기술로 연구되고 있다. 수용성 CBD-ZnO의 성장 거동은 pH, 용해된 Zn 농도, 도펀트 농도, 반응제 등과 같은 용액의 화학적 성질에 의해 영향을 크게 받는다.¹³⁾ 본 연구에서는 수용성 CBD-ZnO의 결정 형태를 제어하기 위해 citrate ion을 사용하였고, citrate 농도에 따른 CBD-ZnO의 구조적, 전기적, 광학적 특성을 연구하였다. 또한 CBD ZnO 박막을 실제 디바이스에 사용 가능한지 평가하기 위해 CIGS 태양전지의 상부 투명 전극을 수용성 CBD-ZnO 박막으로 제작하였으며, 이는 스퍼터링법으로 형성한 ZnO:Al 박막을 상부 투명 전극으로 하는 CIGS 태양전지와 비슷한 성능을 보였다.

2. 실험 방법

유리 기판(25 mm × 25 mm × 1 mm)을 아세톤, 에탄올, 이소프로필 알코올 용액을 이용하여 초음파 세정하였다. ZnO 핵 형성이 용이하도록 기판 표면을 활성화시키기 위해서 기판 상에 seed 층을 스핀 코팅하였다. Seed 용액은 zinc oxide nanoparticle ink(Sigma-Aldrich, 793361)와 이소프로필 알코올을 1:1 비율로 혼합해서 사용하였다. Seed 용액의 스핀 코팅은 200 µl를 5,000 rpm 속도로 40초로 2번 수행하였다. 그 후 120 °C에서 5분 동안 가열하여 용매를 증발시켜 약 50 nm 두께의 seed 층을 형성하였다.

ZnO를 성장시키기 위한 CBD-ZnO 반응 용액의 경우, 50 mM ZnO powder(Sigma-Aldrich, 96479), 50 mM ammonium nitrate(Sigma-Aldrich, 221244), 1 mM Ammonium citrate(Alfa-Aesar, A16973)를 탈 이온수(18.3 MΩ)에 현탁시켰다. 생성된 용액의 pH 값은 약 11.0이 되도록 28 % ammonium hydroxide(Alfa-Aesar, L13168)를 첨가하였다. 이때 ammonium citrate 농도에 따른 ZnO의 성장거동을 확인하기 위해서 citrate 농도는 0 mM, 0.25 mM, 0.5 mM, 1.0 mM, 2.0 mM, 3.0 mM로 변경해 가면서 반응 용액을 제조하였다. 그 후 반응 용액을 밀폐된 용기 내에서 24시간 동안 교반하였다. 용해되지 않고 남아있는 ZnO 입자를 제거하기 위해서 1.0 µm 필터(Whatman, 6783-2510)를 이용하여 반응 용액을 여과하였다. 반응 비커에 seed 층이 코팅된 샘플이 고정

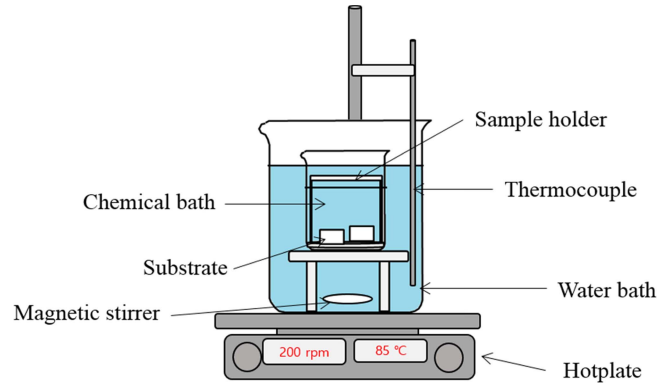


Fig. 1. Schematic of aqueous chemical bath deposition process of ZnO. Glass and CIGS solar cells we used for substrates.

된 테프론 홀더를 침지하고, 85 °C의 온도에서 자기 교반기를 사용하여 200 rpm의 속도로 1시간 동안 교반하였다. 수용액 화학 조 증착 공정의 개략도를 Fig. 1에서 나타냈다. 그 후 모든 샘플을 탈 이온수로 행구고 질소로 건조하였다. 10 % HCl을 이용하여 ZnO 박막이 증착된 샘플의 후면을 닦아주었다. 다시 한번 샘플을 탈 이온수로 행구어 질소로 건조한 후, 120 °C에서 5분 동안 가열하였다. 증착된 ZnO 박막의 전기 전도성을 증가시키기 위해 약 14 mW/cm² 세기의 자외선 램프(UV SMT, UHC 1000)를 사용하여 20분 동안 자외선을 조사하였다.

제조된 CBD-ZnO의 광학 투과도는 UV-Vis spectrometer를 사용하여 유리를 기준으로 측정하였고, 면저항은 4-point probe를 사용하여 측정하였다. CBD-ZnO의 구조적 특성은 Cu-Kα를 사용한 X-ray diffraction(XRD)를 이용하여 분석하였다. CBD-ZnO의 표면 형상을 관찰하기 위해 scanning electron microscope(SEM)을 사용하여 분석하였다. CBD-ZnO의 전기적 특성 변화를 관찰하기 위해 van der Pauw 접촉 방법을 사용하여 Ecopia HMS 5000으로 홀 측정을 수행하였다.

CBD 방법으로 제작된 ZnO 박막이 실제 디바이스에 적용 가능한지 알아보기 위해 CIGS 태양전지를 제작하였다. CIGS 태양전지는 glass 기판 위에 CdS/CIGS/MO 구조로 제작¹⁴⁾하였고 CdS 층 위에 CBD 방법으로 ZnO 박막을 증착하였다. CIGS 박막 태양전지의 전류밀도-전압 특성은 백색광(100 mW/cm², AM1.5G) 조사 조건에서 Keithley 2401 source meter를 이용하여 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

Citrate 농도에 따른 수용액 CBD-ZnO의 우선 배향성을 확인하기 위해 θ -2 θ 스캔 XRD로 분석하였다. Fig. 2는 citrate 농도에 따른 반응 용액으로부터 유리 기판상

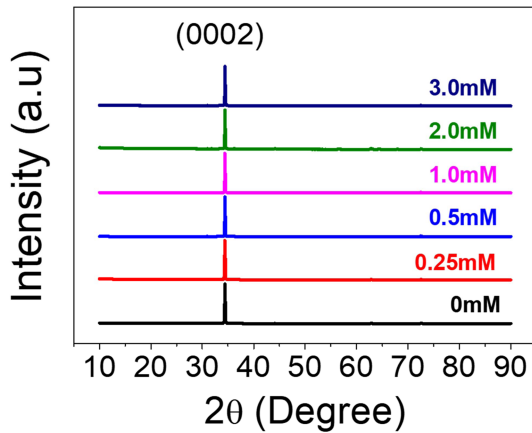


Fig. 2. XRD analysis of aqueous deposited ZnO according to citrate concentration in the reaction bath. Regardless of the citrate concentration, ZnO crystals have a preferential orientation of (0002) plane.

에 수용액 CBD-ZnO의 XRD 분석 결과를 보여준다. ZnO는 $2\theta = 34.4^\circ$ 에서 (0002)면에 대해 우세한 회절 피크가 나타났다. 이는 기판 표면에 수직인 c-축으로의 높은 배향도를 나타낸다. 따라서 수용액 CBD-ZnO는 citrate 농도와 관련없이 (0002)면으로 우선 배향성을 가지는 것을 확인할 수 있었다.

Citrate 농도에 따른 수용액 CBD-ZnO의 표면 미세구조를 관찰하였다. Fig. 3(a)는 citrate의 다양한 농도에 따른 반응 용액으로부터 수용액 CBD-ZnO의 표면 SEM 이미지이다. Fig. 3(a)에서 볼 수 있듯이 citrate가 함유되지 않았을 때 지름이 약 77 nm인 ZnO 로드가 형성하였다. 0.25 mM citrate를 첨가하면 ZnO 로드의 지름은 약 150 nm로 증가하였다. Citrate를 추가로 첨가할수록 ZnO 로드의 지름이 점차 증가하였고 어느 농도 이상에서 육각형 결정을 가진 연속적인 박막이 형성되었

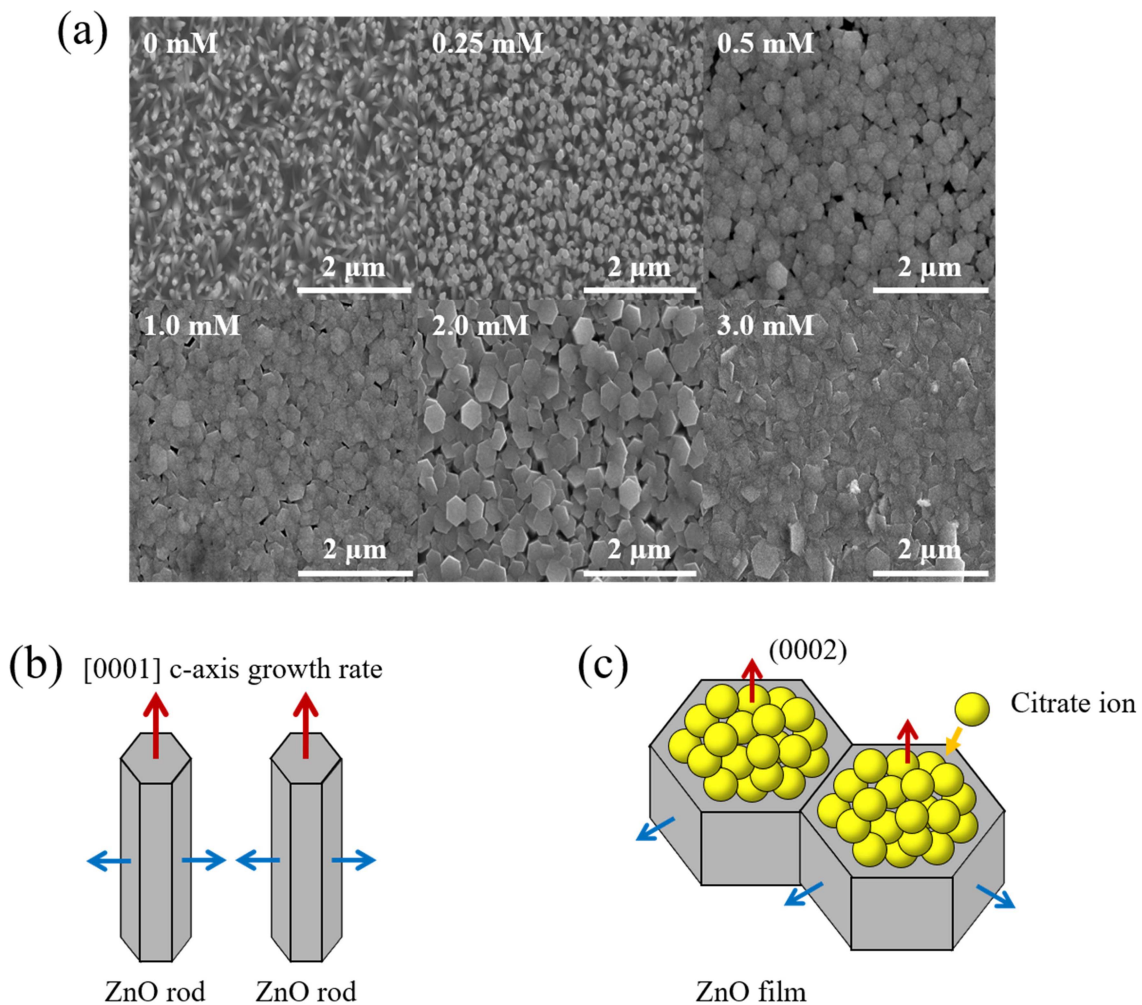


Fig. 3. (a) SEM images showing the surface shape of CBD-ZnO according to citrate concentrations. The concentration is 0 mM, 0.25 mM, 0.5 mM, 1.0 mM, 2.0 mM, 3.0 mM. (b) ZnO crystals grow in the form of nanorods when citrate is not present. (c) ZnO crystals grow in the form of films when citrate is present.

다. 이러한 현상을 설명하기 위하여 반응 용액 내에서의 citrate ion이 ZnO 결정 성장에 미치는 영향을 개략적으로 나타냈다[Fig. 3(b,c)]. Fig. 3(b)에서 볼 수 있듯이 citrate가 존재하지 않을 때 CBD-ZnO는 (0002) 표면으로 우선 배향성을 가지는 것으로 보아 c-축 방향의 성장 속도가 다른 방향에 비해 빠르다는 것을 알 수 있다. 따라서 ZnO 결정이 로드 형태로 성장하게 된다. 반응 용액 내에서 citrate ion은 ZnO의 (0002) 표면에 선택적으로 흡착하여 [0001] c-축 방향 결정성장을 늦추는 역할을 한다.¹⁵⁾ 따라서 Citrate를 첨가하면 (0002) 면의 성장이 억제되고 ZnO 로드의 폭은 계속해서 성장하면서 주위의 다른 ZnO 로드와 충돌하여 연속적인 박막을 형성한다[Fig. 3(c)].

Fig. 4(a)는 citrate 농도에 따른 반응 용액으로부터 ZnO의 투과도를 유리 기준으로 측정하여 나타낸 그래프이다. Citrate 농도가 낮을 때는 빛의 간섭효과가 명확히 나타나지 않았으며 이것은 ZnO 결정이 박막형태가 아닌 로드 형태로 증착되어 있기 때문이다[Fig. 3(a)]. Citrate 농도가 0.5 mM 이상일 때는 투과도 그래프에 빛의 간섭현상이 뚜렷하게 관찰되었다. 이는 citrate 농도가 0.5 mM 이상일 때 ZnO는 박막형태로 성장하기 때

문이다[Fig. 3(a)]. Citrate 농도 0 mM, 0.25 mM, 0.5 mM, 1.0 mM, 2.0 mM, 3.0 mM에 대하여 400~1,100 nm 영역에서 평균 투과도는 약 46%, 72%, 87%, 83%, 87%, 80%이었고, 최대 투과도는 약 79%, 93%, 93%, 87%, 91%, 83% 값을 보였다[Fig. 4(a)]. 연속적인 박막으로 증착된 조건 citrate 농도 0.5 mM~3.0 mM 조건에서 농도가 증가함에 따라 Tauc plot을 통해 측정된 밴드갭은 3.44~3.54 eV까지 전체적으로 증가하는 양상을 보였다[Fig. 4(b,c)]. 이것은 citrate 농도가 증가함에 따라 캐리어 농도가 증가하기 때문인 것으로 판단된다.¹⁶⁾ citrate 농도에 따른 캐리어 농도 변화는 다음 문단에 좀 더 자세히 기술하였다.

Citrate 농도가 0.5 mM 이상인 경우에 ZnO가 연속적인 박막으로 성장하였기 때문에 이 영역에서 citrate 농도에 따른 전기적 특성변화를 관찰하기 위해 홀 측정을 통해 비저항과 캐리어 농도 및 이동도를 측정하였다. Fig. 5(a)는 다양한 농도의 citrate를 함유한 각각의 반응 용액으로부터 수용액 CBD-ZnO 박막의 비저항을 나타낸 그래프이다. 0.5 mM citrate에서 $3.74 \times 10^{-2} \Omega\text{cm}$ 의 비저항이 얻어졌으며 citrate 농도를 1.0 mM로 증가했을 때 비저항은 급격하게 감소하여 $1.56 \times 10^{-2} \Omega\text{cm}$ 를 보였다. 그

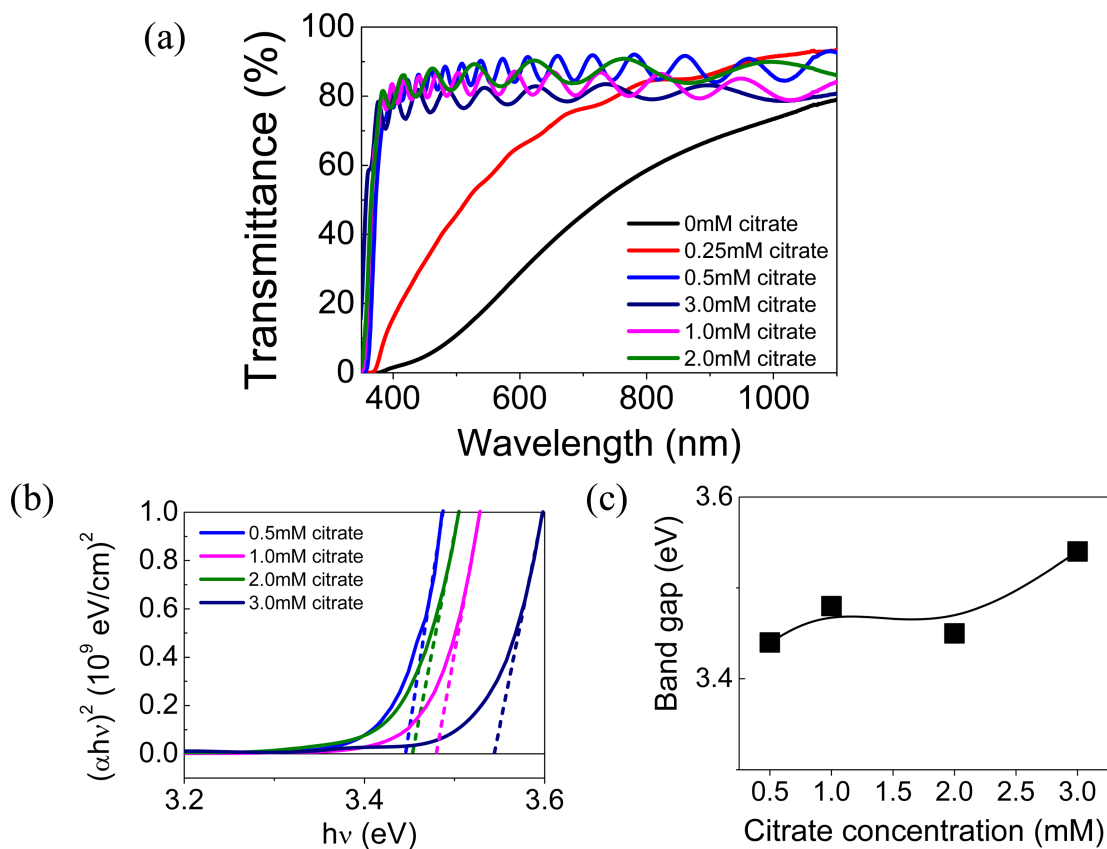


Fig. 4. (a) The transmittance of ZnO deposited from various citrate concentrations. (b) Graph of bandgap calculation through transmittance results. (c) Bandgap change according to citrate concentration.

후 citrate의 추가적인 첨가에 따라 ZnO 박막의 비저항 변화는 미미하게 나타났다. 수행한 실험 범위안에서 얻어진 최소 비저항은 $1.24 \times 10^{-2} \Omega\text{cm}$ 이고, 이때 citrate 농도는 3 mM이다. Fig. 5(b)는 다양한 농도의 citrate를 함유한 각각의 반응 용액으로부터 ZnO 박막의 캐리어 농도 및 이동도를 나타낸 그래프이다. 0.5 mM citrate에서 캐리어 이동도는 $20.6 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ 가 얻어졌으며 citrate 농도를 1.0 mM로 증가하였을 때 캐리어 이동도는 $45.2 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ 로 급격히 증가하였다. 그 후 citrate의 추가적인 첨가에 따른 캐리어 이동도는 비저항과 마찬가지로 미미한 변화를 보였다. 수행한 실험 범위 0.5 mM, 1.0 mM, 2.0 mM, 3.0 mM citrate에서 캐리어 농도는 citrate 농도가 증가함에 따라 점차적으로 증가하였으며 그 값은 각각 $8.13 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, $8.87 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, $9.24 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, $13.3 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 이다.

CIGS 태양전지 제조가격을 절감하기 위하여 용액공정 흡수층과¹⁷⁻²¹⁾ 용액공정 투명전극에²²⁻²⁶⁾ 대한 연구가 진행되었다. 본 연구의 수용액 CBD 방법으로 증착된 ZnO

박막이 실제 디바이스에 잘 작동되는지 평가하기 위해 ZnO 박막을 CIGS 태양전지의 상부 투명전극으로 적용하였다. CIGS 태양전지의 성능은 CIGS/Mo 계면 및 CIGS 흡수층의 전기적 품질에 영향을 크게 받는다²⁷⁾. 따라서 CIGS 태양전지의 상부 투명전극 용도로의 수용액 CBD-ZnO 박막의 적합성을 평가하기 위해 CdS/CIGS/MO 구조를 가지는 기판을 두 조각으로 자른 후 각각의 기판에 1 mM citrate가 첨가된 반응 용액에서 수용액 CBD-ZnO 박막과 스퍼터링 증착된 ZnO:Al 박막을 증착하였다. Fig. 6(a)는 CBD-ZnO 박막이 증착된 CIGS 태양전지의 샘플의 단면 SEM 이미지이다. 이때 CBD-ZnO 박막의 두께는 $1.04 \mu\text{m}$ 증착하였다. Fig. 6(b)는 수용액 CBD-ZnO 층을 포함하는 CIGS 태양전지에 대한 전류밀도-전압 곡선을 나타냈다. 수용액 CBD-ZnO 층을 포함하는 CIGS 태양전지의 $34.1 \text{ mA}/\text{cm}^2$ 의 전류밀도와 0.661 mV 의 개방전압, 65.5%의 충전율, 14.8%의 효율은 스퍼터링 ZnO:Al 박막($32.2 \text{ mA}/\text{cm}^2$, 0.646 mV , 66.4%, 13.8%)을 사용한 기준 셀의 값과 매우 유사하

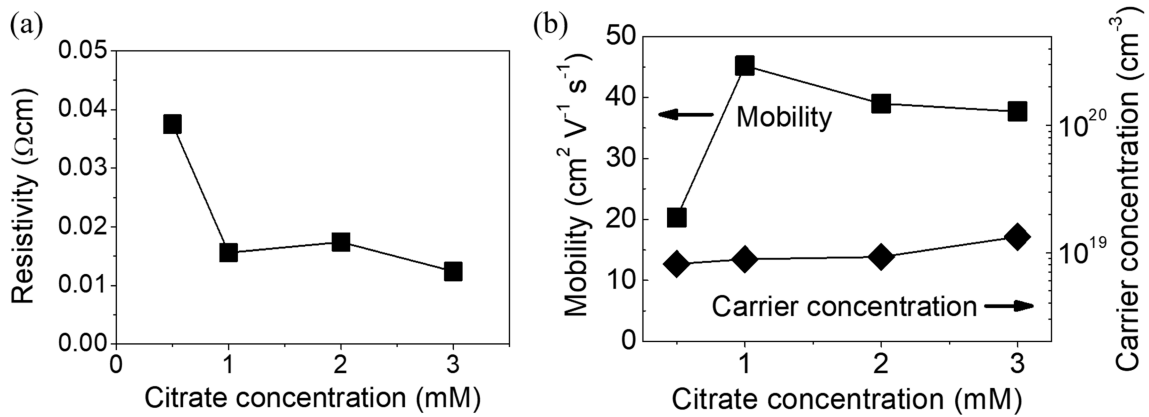


Fig. 5. (a) Resistivity, (b) carrier mobility and carrier concentration of aqueous deposited ZnO thin films from each reaction bath containing various concentrations of citrate.

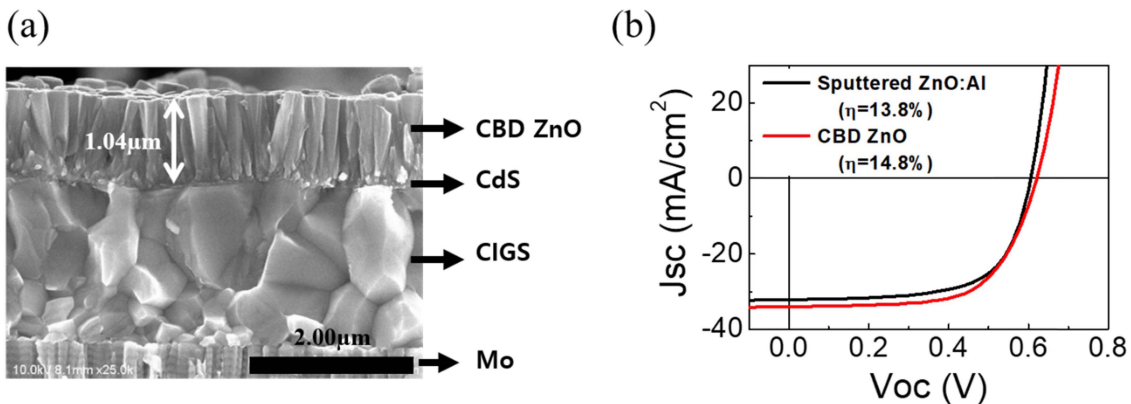


Fig. 6. (a) A cross-sectional SEM image of a CIGS solar cell with an aqueous deposited ZnO top electrode and (b) Current density-voltage curve of the CIGS solar cell.

였다. 따라서, 수용액 CBD-ZnO 박막이 CIGS 태양전지에 잘 적용되는 것을 확인할 수 있었다.

4. 결 론

본 연구에서 citrate 농도에 따른 수용성 CBD-ZnO의 구조적, 전기적, 광학적 특성을 조사하였다. Citrate가 첨가되지 않는 경우 ZnO 결정은 로드 형태로 성장하였고, citrate가 0.5 mM 이상 첨가되면 박막 형태로 성장하는 것을 확인하였다. 0.5 mM citrate에서 $3.74 \times 10^{-2} \Omega\text{cm}$ 의 비저항이 얻어졌고 1.0 mM로 증가했을 때 $1.56 \times 10^{-2} \Omega\text{cm}$ 으로 비저항이 급격하게 감소하였다. 1 mM citrate 이상의 농도에서 비저항의 변화는 미미했으며 3 mM citrate에서 $1.24 \times 10^{-2} \Omega\text{cm}$ 의 최소 비저항이 얻어졌다. 수용액 CBD-ZnO 박막을 실제 디바이스에 사용 가능한지 평가하기 위해 CIGS 태양전지의 상부 투명 전극으로서 적용하였고 스퍼터링법으로 증착한 ZnO:Al 박막을 상부 투명 전극으로 하는 CIGS 태양전지와 매우 비슷한 성능을 보였다. 이를 통해 수용액 CBD-ZnO 박막이 CIGS 태양전지에 잘 적용되는 것을 확인할 수 있었다.

References

- M. Miyake, H. Fukui and T. Hirato, *Phys. Status Solidi A*, **209**, 945 (2012).
- T. Minami, T. Yamamoto and T. Miyata, *Thin Solid Films*, **366**, 63 (2000).
- Z. L. Pei, X. B. Zhang, G. P. Zhang, J. Gong, C. Sun, R. F. Huang and L. S. Wen, *Thin Solid Films*, **497**, 20 (2006).
- V. Musta, B. Teixeira, E. Fortunato, R. C. C. Monteiro and P. Vilarinho, *Surf. Coat. Technol.*, **180**, 659 (2004).
- T. Minami, H. Sato, H. Nanto and S. Takata, *Jpn. J. Appl. Phys., Part 2*, **24**, L781 (1985).
- M. E. Fragala and G. Malandrino, *Microelectron. J.*, **40**, 381 (2009).
- A. Suzuki, T. Matsushita, N. Wada, Y. Sakamoto and M. Okuda, *Jpn. J. Appl. Phys., Part 2*, **35**, L56 (1996).
- Y. Wu, H. Yan, M. Huang, B. Messer, J. H. Song and P. Yand, *Chem. Eur. J.*, **8**, 1260 (2002).
- M. H. Huang, Y. Wu, H. Feick, N. Tran, E. Weber and P. Yang, *Adv. Mater.*, **13**, 113 (2001).
- C. J. Lee, T. J. Lee, S. C. Lyu, Y. Zhang, H. Ruh and H. J. Lee, *Appl. Phys. Lett.*, **81**, 3648 (2002).
- J. F. Guillemoles, L. Kronik, D. Chaen, U. Rau, A. Jasanek and H. W. Schock, *J. Phys. Chem. B*, **104**, 4849 (2000).
- T. Hamada, A. Ito, E. Fujii, D. Chu, K. Kato and Y. Masuda, *J. Cryst. Growth*, **311**, 3687 (2009).
- H. Hagendorfer, K. Lienau, S. Nishiwaki, C. M. Fella, L. Kranz, A. R. Uhl, D. Jaeger, L. Luo, C. Gretener, S. Buecheler, Y. E. Romanyuk and A. N. Tiwari, *Adv. Mater.*, **26**, 632 (2014).
- S. Lee, K. S. Cho, S. Song, K. Kim, Y. J. Eo, J. H. Yun, J. Gwak and C.H. Chung, *J. Vis. Exp.*, **149**, e59909 (2019).
- Z. R. Tian, J. A. Voigt, J. Liu, B. McKenzie, M. J. McDermott, M. A. Rodriguez, H. Konishi and H. F. Xu, *Nat. Mater.*, **2**, 821 (2003).
- J. G. Lu, S. Fujita, T. Kawaharamura, H. Nichinaka, Y. Kamada, T. Ohshima, Z. Z. Ye, Y. J. Zeng, L. P. Zhu, H. P. He and B. H. Zhao, *J. Appl. Phys.*, **101**, 083705 (2007).
- C. H. Chung, S. H. Li, B. Lei, W. Yang, W. W. Hou, B. Bob and Y. Yang, *Chem. Mater.*, **23**, 964 (2011).
- C. H. Chung, B. Lei, B. Bob, S. H. Li, W. W. Hou, H. S. Duan and Y. Yang, *Chem. Mater.*, **23**, 4941 (2011).
- C. H. Chung, T. B. Song, B. Bob, R. Zhu, H. S. Duan and Y. Yang, *Adv. Mater.*, **24**, 5499 (2012).
- C. H. Chung, B. Bob, B. Lei, S. H. Li, W. W. Hou and Y. Yang, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, **113**, 148 (2013).
- C. H. Chung, K. H. Hong, D. K. Lee, J. H. Yun and Y. Yang, *Chem. Mater.*, **27**, 7244 (2015).
- C. H. Chung, B. Bob, T. B. Song and Y. Yang, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, **120**, 642 (2014).
- J. Jang, J. S. Lee, K. H. Hong, D. K. Lee, S. Song, K. Kim, Y. J. Eo, J. H. Yun and C. H. Chung, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, **170**, 60 (2017).
- S. Lee, J. S. Lee, J. Jang, K. H. Hong, D. K. Lee, S. Song, K. Kim, Y. J. Eo, J. Gwak and C. H. Chung, *Nano Energy*, **53**, 675 (2018).
- S. Lee, J. Jang, K. S. Cho, Y. J. Oh, K. H. Hong, S. Song, K. Kim, Y. J. Eo, J. H. Yun, J. Gwak and C. H. Chung, *Sol. Energy*, **180**, 519 (2019).
- S. Lee, J. Jang, T. Park, Y. M. Park, J. S. Park, Y. K. Kim, H. K. Lee, E. C. Jeon, D. K. Lee, B. Ahn and C. H. Chung, *ACS Appl. Mater. Interfaces.*, **12**, 6169 (2020).
- C. H. Chung, *Phys. Rev. Appl.*, **12**, 024060 (2019).

<저자소개>

조경수

한밭대학교 석사과정 학생

장현준

한밭대학교 학부생

오재영

한밭대학교 학부생

김재우

한밭대학교 학부생

이준수

한밭대학교 학부생

최예솔

한밭대학교 학부생

홍기하

한밭대학교 교수

정중희

한밭대학교 교수