



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

工學碩士 學位論文

산화 은이 임베딩 된 다층 투명 전극과 투광형
태양전지 적용에 대한 연구

Study on silver oxide embedded transparent multilayer electrodes
for semi-transparent solar cell



指導教授 安智勳

2019 年 2 月

韓國海洋大學校 大學院

電子素材工學科

趙賢眞

본 논문을 조현진의 공학석사 학위논문으로 인준함.



위원장 김 홍 승 (인)

위 원 안 지 훈 (인)

위 원 양 민 (인)

2019년 02월

한국해양대학교 대학원

목 차

List of Tables	iii
List of Figures	iv
Abstract	vii

제 1 장 서 론	1
-----------------	---

제 2 장 이론적 배경

2.1 OMO 전극의 구조와 특성	
2.1.1 Ag 박막의 특성	4
2.1.2 AgO _x 박막의 특성	8
2.2 실리콘 박막 태양전지	
2.2.1 실리콘 박막 태양전지의 구조 및 이론	6
2.2.2 실리콘 박막 태양전지의 작동원리	8
2.3 Building Integrated Photovoltaics	9

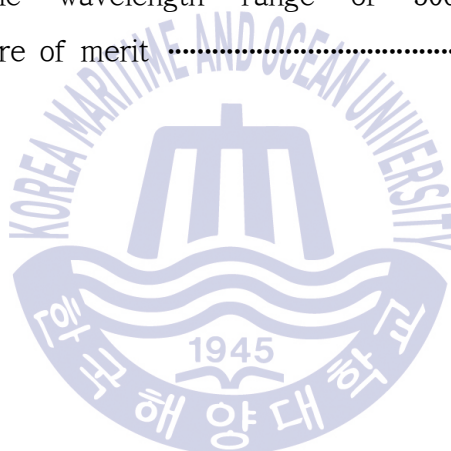
제 3 장 실험 방법

3.1 박막 증착 방법	
3.1.1 OMO 투명전극의 제작	11
3.1.2 실리콘 박막 태양전지의 제작	14
3.2 박막 특성 측정 방법	
3.2.1 X-Ray Diffraction(XRD)	16
3.2.2 Ellipsometry	16
3.2.3 Atomic Force Microscopy	16
3.3 다층 투명전극 분석 방법	
3.3.1 전기적 특성	18
3.3.2 광학적 특성	18

3.4 태양전지의 분석 방법	
3.4.1 태양전지의 효율분석	19
3.4.2 광학적 특성	22
제 4 장 결과 및 고찰	
4.1 산소 유량에 따른 Ag, AgO _x OMO 전극	
4.1.1 OMO 전극의 전기적, 광학적 특성 분석	23
4.1.2 Ag, AgO _x 박막의 특성 분석	25
4.1.3 Ag, AgO _x OMO가 적용된 태양전지의 특성 분석	28
4.2 금속 층 두께에 따른 Ag, AgO _x OMO 전극	
4.2.1 OMO 전극의 전기적, 광학적 특성 분석	33
4.2.2 Ag, AgO _x 박막의 특성 분석	39
4.2.3 Ag, AgO _x OMO가 적용된 태양전지의 특성 분석	44
제 5 장 결론	49
참고 문헌	51

List of Tables

Table 4.1 Comparison of the performance parameters for the silicon thin film solar cells : average transmittance in the wavelength range of 500–800 nm ($T_{500-800}$), efficiency(η) and figure of merit	32
Table 4.2 Comparison of the performance parameters for the silicon thin film solar cells as a function of thickness of Ag and AgO _x films : average transmittance in the wavelength range of 500–800 nm ($T_{500-800}$), efficiency(η) and figure of merit	48



List of Figures

Fig. 2.1 Schematic diagram of circuit model of OMO electrode	5
Fig. 2.2 Schematic diagram of bonding structure of crystalline and amorphous silicon and hydrogenated amorphous silicon	7
Fig. 3.1 Image of multi chamber cluster system used in experiments.	10
Fig. 3.2 Schematic of fabrication process of OMO electrode involving reactive sputtering for AgO_x thin film	12
Fig. 3.3 Schematic of the structure of the semi-transparent thin film silicon solar cells employing a textured fluorine-doped tin oxide (FTO) front and rear OMO electrodes	15
Fig. 3.4 J-V curve of solar cell and the characteristic parameters	21
Fig. 4.1 Sheet resistance of AgO_x -based OMO electrodes as a function of the variation of O_2 flow rate	24
Fig. 4.2 Transmittance of AgO_x -based OMO electrodes as a function of the variation of O_2 flow rate	24
Fig. 4.3 Crystallographic characteristics of AgO_x films as a function of the variation of O_2 flow rate	26
Fig. 4.4 Atomic force microscopy images ($1 \times 1 \mu\text{m}$) and root mean square average of roughness of the AgO_x films	27
Fig. 4.5 Performance characteristics of silicon thin film solar cells. (a) J-V characteristics and (b) variations of cell performance parameters: efficiency (η), short-circuit current density (J_{sc}), open-circuit voltage (V_{oc}), and fill factor (FF).	29
Fig. 4.6 Electrical characteristics of AgO_x based OMO electrodes comprising sheet resistance (R_{sheet}) of the electrodes, series resistance (R_{Series}) of the cells, and fill factor (FF) of the cells.	30

List of Figures

Fig. 4.7 (a) Transmittance of silicon thin film solar cells as a function of the variation of O ₂ flow rate and (b) actual fabricated cells	32
Fig. 4.8 Electrical characteristics of Ag and AgO _x comprising (a) sheet resistance of Ag- and AgO _x -based OMO electrodes and (b) calculated resistivity of single Ag and AgO _x thin films	34
Fig. 4.9 Optical characteristics of Ag- and AgO _x -based OMO electrodes as function of metal layer thickness : average value of (a) transmittance and reflectance and (b) optical loss in the wavelength range of 500 - 800 nm	36
Fig. 4.10 Optical characteristics of Ag- and AgO _x -based OMO electrodes as function of metal layer thickness : measured curve of (a) transmittance and reflectance and (b) optical loss	38
Fig. 4.11 3D images of atomic force microscopy (1 x 1 m) of Ag and AgO _x thin films at the initial growth thickness (2 - 4 nm)	40
Fig. 4.12 Calculated roughness value of Ag and AgO _x films as function of metal layer thickness	40
Fig. 4.13 Water contact angle image and measured angle of Ag and AgO _x thin film	41
Fig. 4.14 Optical properties of Ag, AgO _x and AZO materials (a) refractive index and (b) extinction coefficient	43

List of Figures

- Fig. 4.15** Performance characteristics of silicon thin film solar cells using Ag- and AgO_x-based OMO electrodes. (a) J-V characteristics and (b) variations of cell performance parameters: efficiency (η), short-circuit current density (J_{sc}), open-circuit voltage (V_{oc}), and fill factor (FF) 45
- Fig. 4.16** Transmittance of silicon thin film solar cells as a function of the metal layer thickness using (a) Ag-based OMO electrodes and (b) AgO_x-based OMO electrodes 47



Study on silver oxide embedded transparent multilayer electrodes for semi-transparent solar cell

Hyunjin Jo

Department of Electronic Material Engineering
Graduate School of Korea Maritime and Ocean University

Abstract

In this study, we demonstrated a transparent oxide-metal-oxide (OMO) structure using aluminum-doped zinc oxide and oxidized silver (AgO_x) and applied it as a rear electrode of a semi-transparent solar cell fabricated with silicon thin film. The characteristics of AgO_x OMO were analyzed as function of oxygen addition and thickness of AgO_x thin film. The oxygen addition was optimized at 3 sccm for a Ag-to- Ag_2O intermediate-phase AgO_x OMO to have high transparency without considerable loss in conductivity. The performance of the cell with the optimized OMO showed average transmittance (500–800 nm wavelength, $T_{500-800}$) of 21.9 % and efficiency (η) of 5.48 %. The AgO_x cell resulted an improvement to 120.0 % from 103.5 % of Ag OMO in figure of merit (product of η and $T_{500-800}$). Based on the optimized oxygen flow rate, Ag and AgO_x OMO was fabricated with the varying metal layer thickness, and the OMO with 6 nm of AgO_x showed excellent sheet resistance and transmittance than OMO with 6 nm of Ag. This was caused by a decrease in the critical thickness of percolation due to the AgO_x thin films with surface energy changed by oxygen introduction. The optimized AgO_x OMO cell showed highest $T_{500-800}$ of 27.8 % and η of 5.07 % and improved FOM to 140.8 % from 104.6 %. The developed AgO_x OMO electrodes could be used in BIPV windows or in other optical devices requiring both high transparency and high conductivity.

KEY WORDS: transparent conductive electrode, Oxide/Metal/Oxide, building-integrated photovoltaic, thin film silicon solar cell

산화 은이 임베딩 된 다층 투명 전극과 투광형 태양전지 적용에 대한 연구

조현진

전자소재공학화
한국해양대학교 대학원

Abstract

본 연구에서는 알루미늄이 도핑된 산화 아연과 산화은 (AgO_x)을 이용한 투명 Oxide-Metal-Oxide (OMO) 구조를 연구하여 실리콘 박막으로 제조된 투광형 태양 전지의 후면 전극으로 적용 하였다. AgO_x OMO 전극의 특성은 AgO_x 박막의 산소 유량 및 두께의 함수로서 분석되었다. AgO_x OMO 전극은 전도도의 손실없이 높은 투과도를 갖기 위해 산소 주입은 박막이 Ag-Ag₂O 중간상을 가지는 3 sccm에서 최적화되었다. 최적화 OMO가 적용된 셀의 성능은 평균 투과율 (500-800 nm 파장대, $T_{500-800}$)이 21.9 %이고 효율 (η)이 5.48 %였다. AgO_x 셀에서는 figure of merit (η 과 $T_{500-800}$ 의 곱)가 Ag 셀의 103.5 %에서 120.0 %로 향상되었다. 최적화된 산소 유량에 기초하여, 금속 층 두께에 따라 Ag 및 AgO_x OMO를 제작하였고, 6 nm의 AgO_x 를 갖는 OMO는 6 nm의 Ag를 갖는 OMO보다 우수한 면저항 및 투과도를 가지는 결과가 나타났다. 이것은 산소 주입으로 표면에너지가 변화된 AgO_x 박막에 의해 percolation이 되는 임계 두께가 감소한 것에서 초래되었다. 최적화된 AgO_x OMO 셀은 $T_{500-800}$ 이 27.8 %, η 가 5.07 %로, FOM이 Ag에 비해 104.6 %에서 140.8 %로 향상되었다. 개발된 AgO_x OMO 전극은 높은 투명성과 높은 전도성을 요구하는 BIPV window 또는 다른 광학 장치에 사용될 수 있을 것이다.

KEY WORDS: 투명전극, Oxide/Metal/Oxide, 건물 일체형 태양전지, 실리콘 박막 태양전지

제 1 장 서 론

투명 전도성 전극 (Transparent Conducting Electrode, TCE)는 발광다이오드, 건물 일체형 태양전지 (Building integrated photovoltaics, BIPV), 터치 패널 등의 광전소자에 널리 이용되고 있다. 그 중 BIPV는 신재생 에너지로서 반영구적인 에너지원이며 건물 자체적인 에너지 절감효과가 크기 때문에 활발히 연구되고 있다 [1-4].

BIPV를 위해서는 투광형 태양전지가 요구되며 이를 위해서는 저온증착이 가능한 투명전극이 필요하다. 또한 높은 전력변환효율과 심미성을 위해서 높은 가시광선 영역의 투과도와 낮은 면저항이 요구된다. 이 때문에 전기적, 광학적 특성이 뛰어난 인듐 주석 산화물 (Indium Tin Oxide, ITO)이 많이 사용되고 있다. 하지만 ITO의 경우, 인듐의 희소성으로 인해 태양전지의 중요한 요소인 경제성을 저하시키고, 우수한 성능을 얻으려면 고온 공정이 필수적이다 [5]. 이 때문에 낮은 생산비용으로 높은 성능을 얻을 수 있는 저온증착 투명전극의 개발이 필요하다. 저온증착이 가능한 투명전극으로는 투명 전도성 산화물 (Transparent Conducting Oxide, TCO) [6], 탄소 나노 튜브 (Carbon nanotubes, CNT) [7-10], 그래핀 [11-13], 은 나노와이어 (Silver nanowires, Ag nw) [14-17], 산화물/금속/산화물 (Oxide/Metal/Oxide, OMO) 다층 투명전극 [18-26] 등이 활발히 연구되고 있다. 하지만 이러한 투명전극들은 태양전지에 요구되는 성능에 못 미치거나, 대면적 공정, 장기간 안정성, 높은 생산 비용 등의 문제점을 안고 있다. 반면 OMO 전극은 저온증착이 가능하며 100 nm 이하의 얇은 두께에서도 높은 전기전도도와 광 투과도를 얻을 수 있다 [20-25]. 이러한 OMO 투명전극의 금속 층에는 전기 전도도가 가장 뛰어난 금속인 Ag가 일반적으로 사용된다 [27]. Ag 박막은 가시광선 영역의 반사현상으로 주된 전자의 이동 경로이자 투과도 하락의 원인이기 때문에 그 두께에 따라서 OMO 전극의 전도도와 투과도가 결정된다. 이 때문에 Ag 층의 두께를 최적화시키기 위한 연구가 많이 이루어

어졌다 [21-25]. 하지만 Ag는 낮은 표면에너지로 초기 성장에서 뚜렷한 island를 형성하기 때문에 전기적 연결을 위해서는 두꺼운 두께의 증착이 필요하다. 반면, 두꺼운 Ag 박막은 투과도를 감소시키는데, 이 때문에 우수한 전기적 특성을 얻기 위해서는 투과도 감소가 불가피하다 [28].

본 연구에서는 Ag로 인한 반사를 줄이고 박막 임계두께를 감소시키기 위해서 소량의 산소 (O_2)가 주입된 AgO_x 를 금속 층으로 도입하였다. 기존에 보고된 단일 AgO_x 박막의 연구에서는 산소유량이 증가하면 전기전도성이 손실되지만 광반사를 감소시킬 수 있다고 알려져 있다 [29-32]. 또한, 소량의 산소 주입에서는 적은 비저항 증가와 큰 반사의 감소가 나타났다. 이를 TCO 물질 중 하나인 AZO 층 사이에 증착하였으며, AZO/Ag/AZO 구조의 다층 투명전극을 제작하는 것으로 전기전도도의 손실은 거의 없이 투과도를 크게 향상시키는 것을 목표로 OMO 전극 제작을 진행하였다. 단일 AZO 박막 또한 투명전극으로서 사용이 가능하지만 기존의 TCO와 마찬가지로 성능 향상을 위해서는 고온의 공정이 요구된다.

금속 층으로 Ag와 AgO_x 를 각각 사용한 OMO 전극에 대해서 박막의 증착 중 주입되는 산소 유량에 따른 전기적, 광학적 특성의 변화를 보고 그 원인을 표면 형상학적, 결정학적, 광학적으로 분석하였다. 이후 산소 주입이 금속 층의 최적 두께에 미치는 영향을 분석하고 두께에 따른 전기적, 광학적 특성을 확인하였다. 또한 개발된 AgO_x OMO 투명전극을 BIPV를 위한 투광형 태양전지로 제작하기 위해 실리콘 박막 태양전지의 후면 전극으로 적용하여 그 특성을 Ag OMO 투명전극과 비교, 평가하였다.

제 2 장 이론적 배경

2.1 OMO 전극의 구조와 특성

우수한 투명전극의 개발이 요구됨에 따라 다양한 투명전극 소재가 연구되고 있다. 현재 가장 널리 사용되는 투명전극 소재는 ITO 이지만 제한적 자원, 높은 가격, 고온의 제조 공정 등의 불리한 점이 있다. 이를 대체할 후보군으로 CNT, graphene, Ag nw, TCO, OMO 투명전극이 연구되고 있다. 하지만 CNT와 graphene은 저항이 높기 때문에 85 % 이상의 높은 광투과도와 약 $10\Omega/\square$ 이하의 면저항을 요구하는 태양전지의 조건에는 적합하지 않다. 상대적으로 graphene은 저항이 낮지만 대면적화가 어려우며 CVD를 통한 생산으로 제조 단가가 높다는 단점이 있다. Ag nw는 그 투과도와 전도성이 우수하나 Ag의 산화현상으로 장기간의 안정성이 보장되지 않는다. 투명전극으로서의 성능이 우수하고 생산도 용이한 TCO 전극은 제조 중 고온의 공정이 필요하기 때문에 저온 공정이 필요한 BIPV 태양전지에는 적합하지 않다. 이에 반해 Oxide/Metal/Oxide 구조의 OMO 투명전극은 ITO를 대체하기 위한 유망한 소재로 연구되고 있다.

OMO 전극은 광학적, 전기적으로 우수한 성능을 보유하고 있으며, 상온에서 증착이 가능할 뿐만 아니라 이미 많이 개발되어 있는 스퍼터링 (sputtering) 기술을 이용하기 때문에 높은 생산성을 보유하고 있다는 장점을 가지고 있다. 산화물 층과 금속 층의 박막을 적층하여 제작하는 OMO 전극은 금속 층의 높은 전도성 덕분에 높은 성능을 가질 수 있다. 또한 기계적 유연성이 뛰어나 차세대 유연소자에 응용하는 연구도 활발히 이루어지고 있다. 이러한 OMO 전극의 금속 층에는 전기전도도가 가장 좋은 금속인 Ag를 주로 사용하며 Ag와 비슷한 전도도와 상대적으로 저렴한 가격을 가진 Cu 또한 많이 사용되고 있다.

OMO 구조에서 투명전극의 면저항은 Fig. 2.1와 같이 병렬 구조의 등가회로 개략도로 설명할 수 있다. 산화물의 면저항은 금속에 비해 매우 크므로 옴의 법칙에 의해 전체 면저항은 금속층에 의존하게 된다. 따라서, 이러한 OMO 투명전극의 전기적, 광학적 특성은 금속 층의 표면 거칠기와 두께에 따라 많이

변화한다. 금속 층은 island 구조에서 저 전도성을 띄게되며 연속 층을 형성하여야만 고 전도성을 가진다. 따라서 OMO 구조의 높은 전기 전도도를 위해서는 금속 층 표면 형태의 최적화가 필수적으로 이루어져야 한다. 이를 위해서 가스 도핑, seed 층 증착, 증착 온도 조절 등의 방법과 같은, 금속 층이 percolation 이 되는 임계두께를 감소시키려는 연구들이 많이 진행되고 있다. [22, 33-36]

2.1.1 Ag 박막의 특성

OMO 전극을 위한 금속의 재료로는 일반적으로 Ag 및 Cu가 사용되고 있다. 이는 가시광선 및 근적외선 스펙트럼 범위에서 비교적 낮은 광학 손실로 인한 높은 광학 투과성을 나타내는 것으로 알려져 있다. 일반적으로 Ag는 금속 중에서 가장 낮은 전기 저항 및 가시광선 스펙트럼 범위에서의 광학 손실을 가지기 때문에 많이 사용되고 있다. 하지만 금속 특유의 강한 금속 결합 때문에 박막의 두께가 얇을 때에는 island 형태의 Volmer-Weber 성장을 하게 된다. Island 형태의 Ag 박막은 전기적 경로가 단절되어 높은 저항을 가지며 계면 산란 및 플라즈몬 현상을 발생시켜 광 손실을 유발한다. Ag 박막이 두꺼워지면 연속 층 형성이 되고 percolation이 되어 저항이 낮아지게 된다. OMO 전극의 전기적 성능을 위해서는 두꺼운 Ag 층이 필수적이지만 Ag층이 두꺼울수록 가시광선 및 근적외선 범위의 광 손실은 불가피하게 된다.

2.1.2 AgO_x 박막의 특성

일반적으로 AgO, Ag₂O와 같은 AgO_x는 유전체에 가까운 물질로 알려져 있다. 그 단일 박막에 대해서 산소 함량 별 전기적, 광학적 연구가 많이 진행되어 있는 상태이며 산소가 증가할수록 전도성은 감소하고 투과도는 증가한다. 또한 AgO_x는 산소의 양에 따라서 굴절률, 밴드갭과 성장 형태 등 금속 Ag와는 물성의 차이가 큰 물질이다. 이러한 AgO_x의 광학적 특성을 Super-RENS (super-resolution near-field)에 이용하는 연구가 주를 이루고 있으며 전극으로서 높은 비저항으로 인해 사용이 제한적이다.

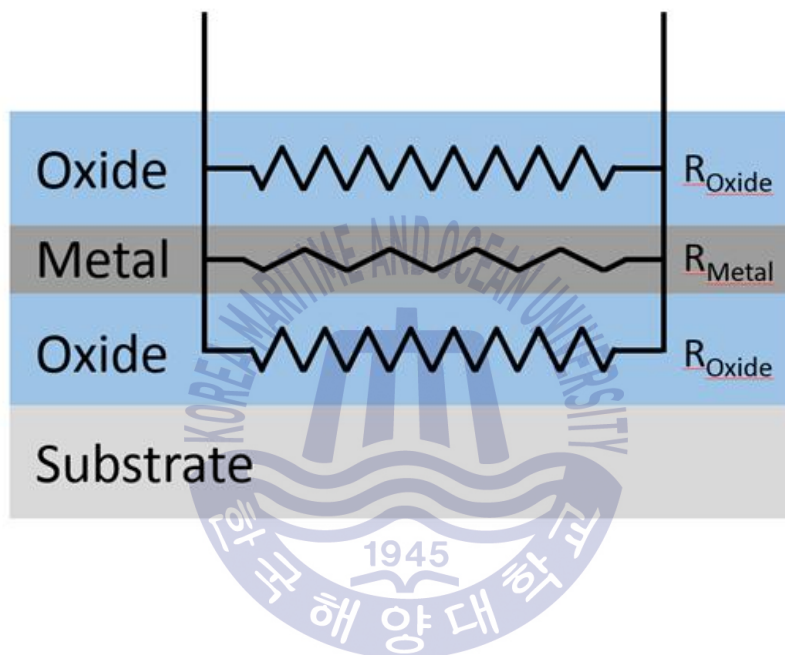


Fig. 2.1 Schematic diagram of circuit model of OMO electrode

2.2 실리콘 박막 태양전지

2.2.1 비정질 실리콘 박막

결정질 실리콘은 8.431 Å의 격자상수로 다이아몬드 구조를 가지며 하나의 원자 주변에 4개의 원자들이 규칙적인 형태로 공유결합을 하고 있다. 반면에 결정질 실리콘과 결합각, 결합길이가 비슷한 비정질 실리콘 (a-Si)은 미결합 상태 (dangling bond)가 많기 때문에 하나의 원자마다 4개의 공유결합을 완전히 이루지 못하고 규칙적인 결합이 나타나지 않는다. 페르미 준위 (Fermi level)을 고정 (pinning)시키는 작용을 하는 dangling bond로 인해 국지화된 상태 (localized state)가 되기 때문에 p형 또는 n형으로의 도핑을 방해된다. 이 때문에 dangling bond는 결합으로 간주되며, 결합밀도를 감소시키기 위하여 a-Si:H (hydrogenated amorphous silicon)를 적용시킨다. a-Si에 수소를 주입하면 dangling bond에 연결되는데 이는 localized state를 감소시키고 결합밀도를 줄이게 된다. 즉, a-Si의 수소화는 도핑이 용이하게 만들어주며 p-i-n 접합 구조를 실현시켜 태양전지를 제작할 수 있다.

a-Si의 band gap은 1.7eV, 결정질 실리콘은 1.1eV이다. 결정질 실리콘의 밴드 갭이 작기 때문에 더 많은 태양빛을 흡수할 것 같지만 태양의 가시광선 영역에서만 흡수되는 빛은 a-Si가 결정질 실리콘보다 100배나 더 많다는 이점이 있다. 이는 1μm 두께의 a-Si이 태양 빛의 가시광 영역을 대부분 흡수한다는 점에서 알 수 있다. 하지만 오랜 시간 동안 태양광 노출 하에서 a-Si은 열화현상이 일어나고 태양전지에 적용했을 때 생기는 불순물은 전자와 정공의 이동에 악영향을 준다. 따라서 a-Si:H를 태양전지에 적용시키기 위해서는 두께의 최적화가 필요하다.

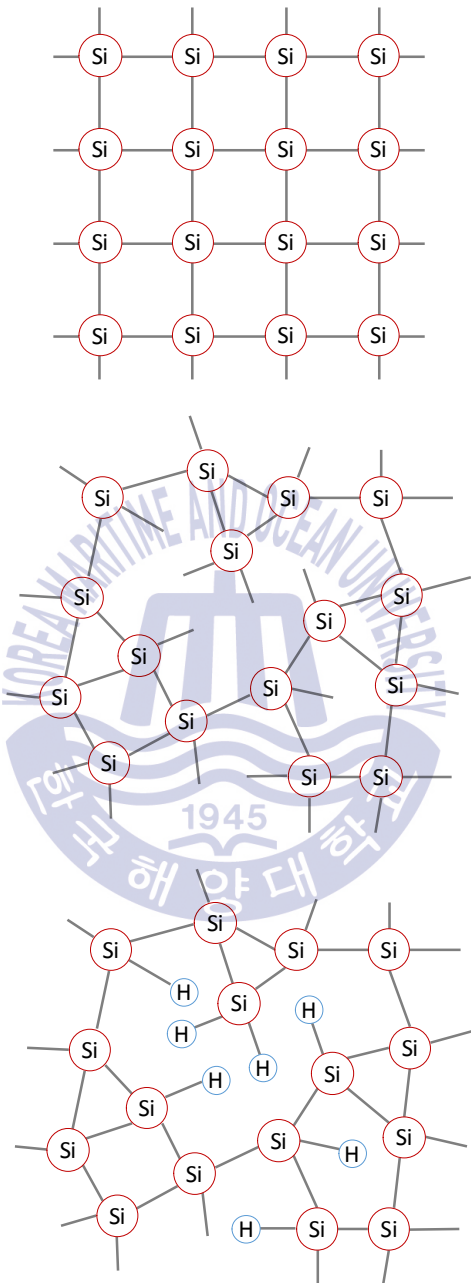


Fig. 2.2 Schematic diagram of bonding structure of crystalline and amorphous silicon and hydrogenated amorphous silicon

2.2.2 실리콘 박막 태양전지의 구조 및 작동원리

a-Si 또는 미세결정질 실리콘 ($\mu\text{c-Si}$) 박막 태양전지는 높은 투명성과 우수한 전도성을 가진 전면전극 위에 p-type Si, intrinsic Si, n-type Si이 적층된 p-i-n 접합구조로 제조된다. 후면전극에는 일반적으로 광 반사도가 좋고 전도성이 뛰어난 Ag가 사용된다. 이때 주된 광 흡수 층인 intrinsic Si박막은 입사된 태양빛의 광자를 흡수하여 발생하는 광전 효과 (photoelectric effect)에 의하여 전자-정공 쌍 (electron-hole pair)을 생성한다. 분리된 전자-정공 쌍은 p-Si와 n-Si 박막에 의해서 형성된 전기장 (electric field)에 의해 표동 (drift)하거나 자유 확산을 하게 되어 p층과 n층으로 각각 수송 및 수집된다. 전기장의 형성 이유는 p-i-n 층의 접합에서 밴드간의 천이에 의한 것 이며, 전자와 정공을 표동시키는 전기장은 p층과 n층의 전위차에 의해 발생하게 된다. a-Si은 결정질 실리콘과 다르게 매우 작은 grain으로 인해 캐리어 이동도가 매우 낮아서 p-i-n 구조로 제작하는 것이 필수적이다. 또한 p층과 n층에 산소를 도핑하거나 탄소를 도핑하여 밴드갭을 제어할 수 있는데, 이는 에너지 밴드 매칭을 통하여 V_{bi} 를 증가시키거나 전자 및 정공 수송을 도와 개방 전압 또는 단락 전류를 증가시킬 수 있다. 이러한 도핑은 p층의 밴드갭을 늘려 투과되는 광량을 늘려 광흡수 층인 i층으로 더 많은 광자를 입사시킬 수 있고 n층에서는 손실되는 광량을 줄여 효율과 투과도 모두 개선시킬 수 있기 때문에 많은 연구가 진행되고 있다.

2.3 Building Integrated Photovoltaics

Building Integrated Photovoltaics (BIPV)는 건물 외벽, 지붕 및 창문에 태양전지를 접목시키는 기술이며 건물 자체의 에너지 절감효과가 크기 때문에 각광받고 있는 기술이다. 또한 전력 밀도에 비해 태양광 패널을 설치할 대지가 부족하고 건물이 많은 우리나라의 조건에 적합한 기술이기도 하다. 이러한 BIPV 태양전지 중에서도 창문에 적용을 시키는 BIPV window가 많이 연구되고 있다. BIPV window는 그 자체로 심미성을 가지며 건물 외벽에서 차지하는 비율이 크기 때문에 전력 생산에 중요한 역할을 할 수 있다. BIPV window의 심미성을 위해서는 기존의 불투명한 태양전지가 아닌 투광형 태양전지(semi-transparent solar cell)가 필요하다. 이를 위해서는 후면 전극에 금속 전극이 아닌 투명전극을 증착하여야만 한다.

BIPV window를 위한 투광형 태양전지에는 무독성의 재료, 대면적 제작의 용이성, 저온 증착 공정, 활성층 두께 조절로 투과도를 제어 가능하다는 장점으로 인해 a-Si 박막 태양전지가 많이 사용되고 있다. 하지만, a-Si 박막은 고온 공정을 거치게 되면 전면의 TCO 전극과의 사이에서 결함이 발생하여 효율하락이 발생한다. 이 때문에 후면전극에는 저온 증착이 가능한 투명전극이 적용되고 있다. 또한, 투광형 태양전지에서는 심미성을 위한 투과도와 전력 발전을 위한 변환 효율, 둘 다 중요한 요소가 된다. 각각의 특성은 trade-off 관계를 가지기 때문에 높은 성능을 위해서는 태양전지 공정의 최적화가 필수적이다.

제 3 장 실험 방법

3.1 박막 증착 방법

모든 공정은 다중 챔버 클러스터 시스템을 이용하여 in-situ로 진행되었다. Load Lock을 제외한 모든 챔버는 Turbo Molecular Pump (TMP)를 이용하여 고진공 상태를 유지한다. 다중 챔버 클러스터는 각각 p/i/n 층 실리콘 박막을 위한 Plasma-Enhanced Chemical Vapor Deposition (PECVD) 장비 3 대와 OMO 전극의 산화물 층과 금속 층을 위한 Sputter 2대로 구성이 되어있다. 본 실험에서 사용한 다중 챔버 클러스터의 사진을 Fig. 3.1에 나타내었다.

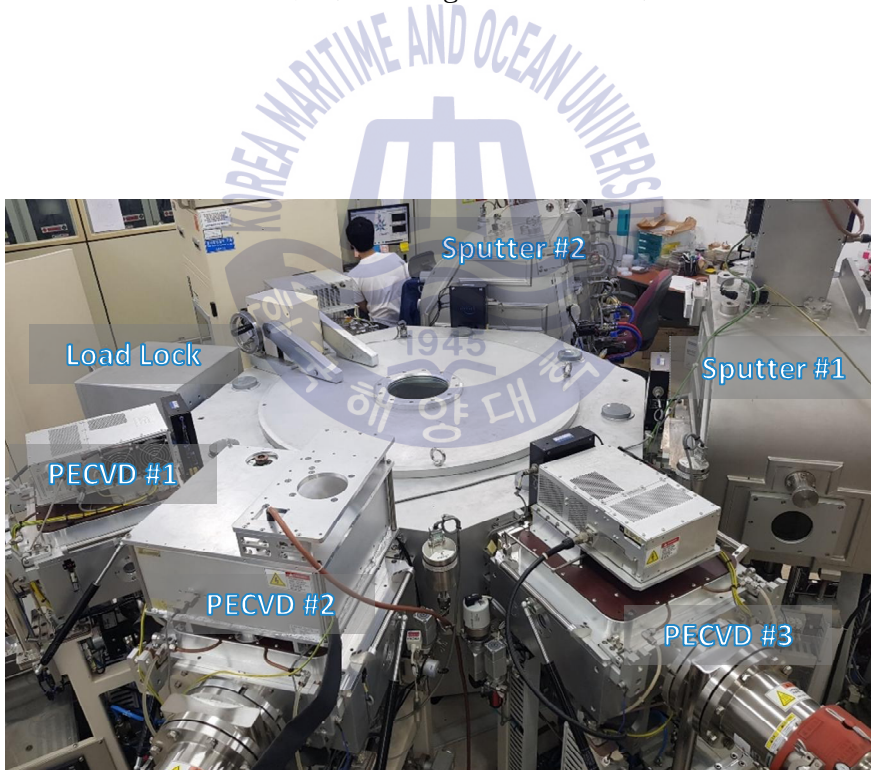


Fig. 3.1 Image of multi chamber cluster system used in experiments.

3.1.1 OMO 투명전극의 제작

모든 OMO 투명전극은 상온에서 산화물 bottom 층/ 금속 임베딩 층/ 산화물 top 층을 차례로 증착하여 제작되었다. 단일 투명전극의 전기적, 광학적 분석을 위한 기판으로는 soda-lime glass를 사용하였고 해당 기판은 $5 \times 5 \text{ cm}^2$ 의 크기로 세절하여 사용하였다. 모든 스퍼터링 공정은 1.8×10^{-6} Torr까지 배기한 후 진행되었다.

(1) Metal layer의 제작

OMO 전극의 금속 층으로는 Ag와 AgO_x 박막을 사용하여 각각 AZO/Ag/AZO 또는 AZO/ AgO_x /AZO의 구조로 적층하여 제작되었다. 금속 층의 증착도 마찬가지로 DC magnetron sputter 법을 사용하였고, 0.125 W/cm^2 의 전력밀도에서 진행되었다. Ag의 스퍼터링 공정은 20 sccm의 Ar을 흘리며 진행되었으며 4 mTorr의 공정압력을 유지하였다. AgO_x 박막은 산소를 추가적으로 주입하여 발생시킨 반응성 스퍼터링 (reactive sputtering)을 이용하여 증착하였다. 여기서 각각 산소유량과 Ag 및 AgO_x 층의 두께를 변수로 실험을 진행하였다. Ag와 AgO_x 박막의 두께는 surface profiler (P-11, KLA-Tencor)를 이용하여 측정하였다. AgO_x 의 Reactive sputtering 공정을 포함한 OMO 전극 제작 공정의 모식도가 Fig. 3.2에 나타나있다.

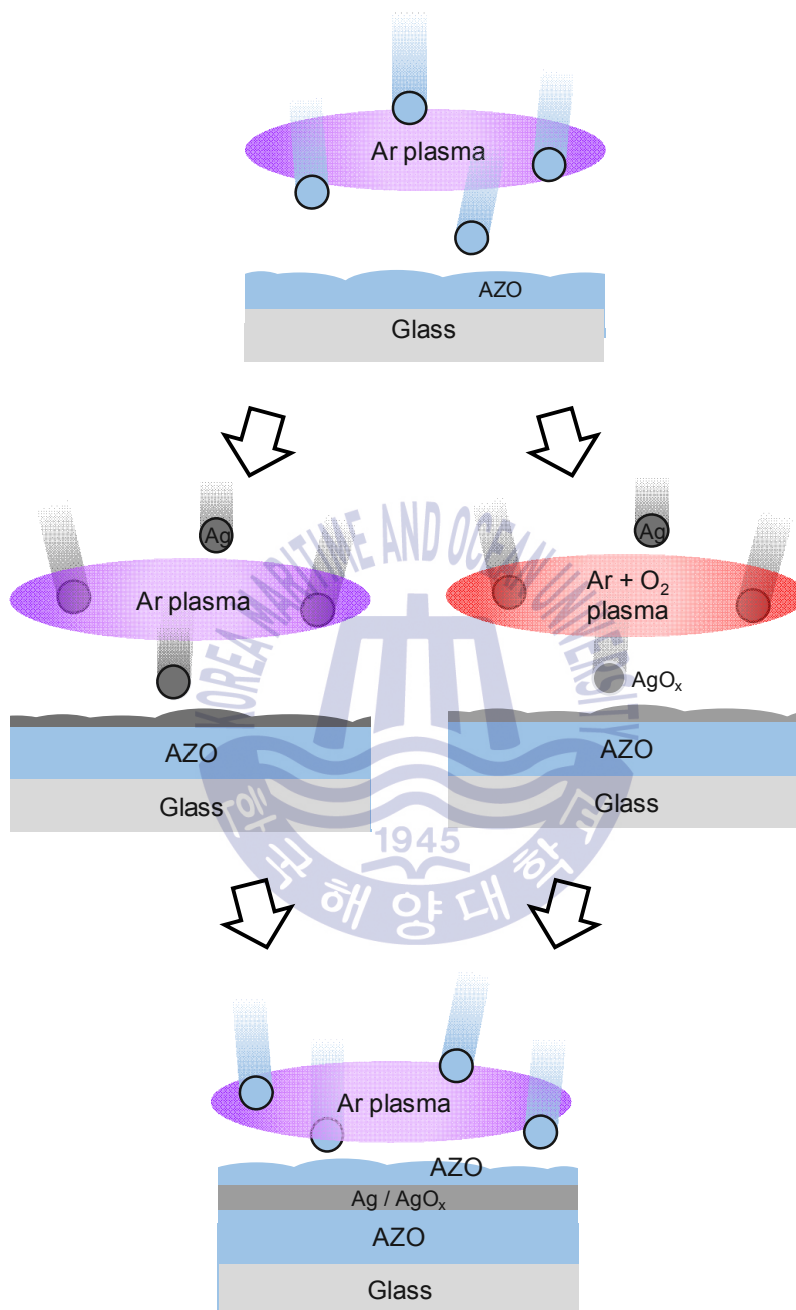


Fig. 3.2 Schematic of fabrication process of OMO electrode involving reactive sputtering for AgO_x thin film

(2) Oxide layer의 제작

연구에 사용된 OMO 투명전극의 산화물 층으로는 Al이 도핑된 ZnO (Al:ZnO, AZO)를 사용하였다. 증착은 DC magnetron sputter 법을 사용하였고, 실험에 사용된 AZO 박막은 1.25 W/cm^2 의 전력밀도에서 스퍼터링하여 증착하였다. 스퍼터링은 10.2 sccm의 Ar을 흘리며 진행되었으며 2 mTorr의 공정압력을 유지하였다. 타겟으로는 ZnO에 1 wt %의 Al이 도핑된, $40 \times 10 \text{ cm}^2$ 의 AZO 타겟을 사용하였다. OMO 전극의 bottom 층과 top 층으로 증착하였으며 각각 50 nm로 고정되었다.



3.1.2 실리콘 박막 태양전지의 제작

(1) 실리콘 박막의 증착

모든 실리콘 박막은 Plasma-Enhanced Chemical Vapor Deposition (PECVD) 방법을 통하여 증착되었다. 공정온도는 250 °C로 유지되었으며 각각의 p/i/n 타입 실리콘 박막의 공정은 독립된 챔버에서 진행하였다. p와 n 타입 실리콘 박막에는 13.56 MHz의 RF가 사용되었고 50 W의 파워가 인가되었으며 i 층 실리콘 박막에는 40.68 MHz의 VHF가 사용되었으며 30 W의 전력이 인가되었다. i 층 a-Si:H 박막 증착을 위해 H₂와 SiH₄ 가스가 사용되었다. p 타입 a-SiO_x:H 박막 증착에는 엑셉터와 산소 도핑을 위한 디보란 (B₂H₆)과 이산화탄소 (CO₂)가, n 타입 a-SiO_x:H 박막 증착에는 도너와 산소 도핑을 위한 포스핀 (PH₃)과 CO₂가 추가적인 도핑 가스로 주입되었다. 각각의 p, i, n 층은 25, 200, 30 nm로 증착되었다.

(2) 실리콘 박막 태양전지의 제작

실리콘 박막 태양전지를 제작하기 위한 기판은 Pilkington 사의 상업용 표면 처리된 fluorine-doped tin oxide (FTO)가 증착된 glass를 사용하였으며 크기는 5 x 5 cm²로 세절하여 사용하였다. 증착하기에 앞서 FTO glass 기판을 아세톤, 증류수에 각각 10분 씩 sonicator로 세척한 뒤 N₂ gas로 blowing하였다. 태양전지는 FTO 기판에 p-i/n- 층의 a-Si:H 박막을 차례로 증착한 뒤 전극 패턴 형성을 위한 shadow mask를 부착하여 산화물 층과 금속 층을 적층하여 증착하여 제작하였다. 태양전지의 구조는 Fig. 3.3에 나타내었다. 각각의 셀 면적은 shadow mask에 의한 OMO 전극의 넓이로 정의되었으며, 효율측정을 위한 0.5 x 0.5 cm² 크기와 광학적 분석을 위한 2 x 2 cm² 크기로 제작되었다.

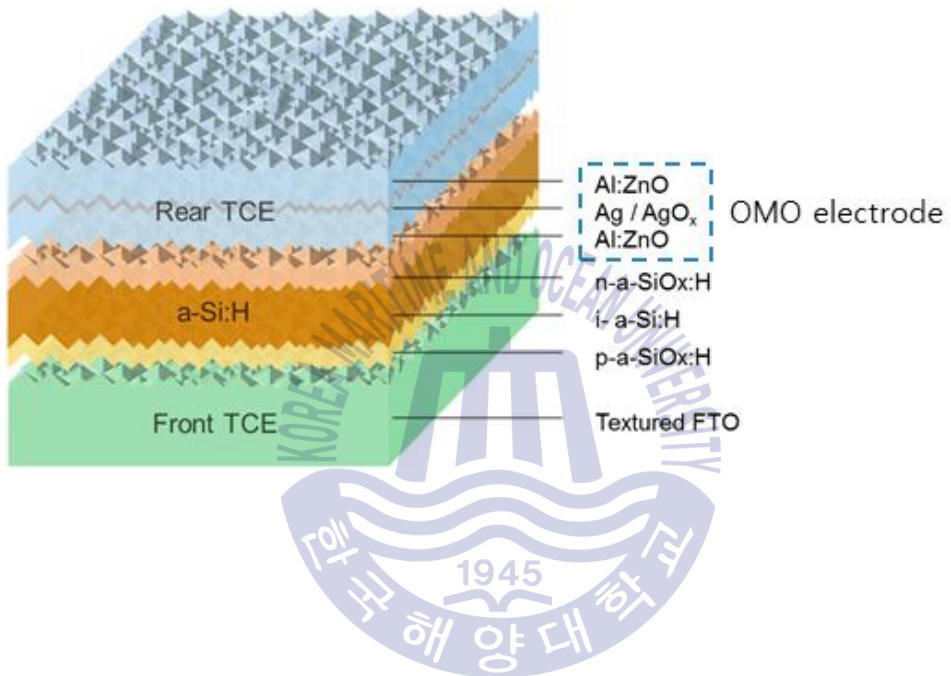


Fig. 3.3 Schematic of the structure of the semi-transparent thin film silicon solar cells employing a textured fluorine-doped tin oxide (FTO) front and rear OMO electrodes

3.2 박막 특성 측정 방법

3.2.1 X-Ray Diffraction(XRD)

Ag와 AgO_x 박막의 산소 주입 조건에 따른 결정학적 특성을 확인하기 위하여 XRD (X'pert MPD, PANalytic)를 사용하였다. XRD 분석은 2θ 회절 분석법으로 30 - 80° 의 변위로 측정하였으며 Cu, K _{α} 소스를 사용하였다. XRD 측정을 위한 시료는 AZO 50 nm가 증착된 glass 기판위에 30 nm의 Ag 또는 AgO_x를 증착하여 준비하였다.

3.2.2 Ellipsometry

박막의 광학적 특성 분석을 위하여 Ellipsometer (SE MG-1000, nano-view)를 사용하였다. Ellipsometry를 통하여 Ag, AgO_x 단일 박막의 산소 주입 조건과 두께에 따른 굴절률(n)과 흡광계수(k)를 측정하였으며, 또한 모든 실리콘 박막과 산화물 층의 두께 측정에도 이용되었다. 두께 측정과 AZO 박막의 n, k 값을 측정하기 위한 시료는 glass 기판위에 단일박막으로 증착하여 측정하였다. Ag와 AgO_x 박막 시료는 동일한 성장조건을 위하여 AZO 50 nm가 증착된 glass 기판에 증착하여 준비하였다. n, k 값은 300 - 800 nm 파장대역에서 측정하였으며 측정된 값은 FDTD 시뮬레이션을 할 때에도 이용되었다.

3.2.3 표면 특성 분석

Ag와 AgO_x의 표면 특성 분석을 위하여 atomic force microscopy (AFM)과 접촉각 측정을 진행하였다. 측정을 위한 시료는 모두 동일한 성장모드를 위하여 AZO 50 nm가 증착된 glass 기판위에 준비되었다. 박막의 표면 형상 분석 및 거칠기 측정에는 atomic force microscope (NX10, Park system)을 이용하였으며 산소 유량에 따른 조건과 금속 층 두께에 따른 조건 전체에서 분석되었다. 표면 거칠기는 $1 \times 1 \mu\text{m}^2$ 면적에서 root mean square 값으로 계산되었다. Ag와 AgO_x의 표면에너지를 분석하기 위해서 접촉각 측정을 진행하였으며 contact

angle goniometry (SDLAB-200TEZ, Femtofab)을 사용하였다. 증류수를 5 μ l 씩 떨어뜨려 접촉각을 확인하였다.



3.3 다층 투명전극 분석 방법

투광형 태양전지에 적용하기 이전에 단일 OMO 투명전극 조건에 대한 분석을 진행하였다. 산소 유량 별, 금속 층 두께 별 조건에서의 OMO 투명전극을 glass 기판위에 증착하여 전기적, 광학적 특성을 분석하였다. 모든 시료는 5 x 5cm² 크기로 제작하였다.

3.3.1 전기적 특성

AgO_x의 주입 산소 유량 별, 금속 층 두께 별 조건으로 제작된 OMO 투명전극의 면저항을 측정하기 위해서 4개의 탐침이 1 mm 간격으로 일렬 구성된 4-probe system (MCP-T600, Mitsubishi Chemical Co.)을 사용하였다. 각각의 면저항은 5 번 측정하여 평균 값으로 계산하여 오차를 줄였으며 그 오차범위 또한 표시하였다.

3.3.2 광학적 특성

AgO_x의 주입 산소 유량 별, 금속 층 두께 별 조건으로 제작된 OMO 투명전극에서 ultraviolet-visible spectrophotometer (Cary 5000, Varian)을 이용하여 광특성을 측정하였다. 분석은 300 - 800 nm에서 투과도와 반사도를 측정하여 진행되었다. 광 투과도를 측정할 때에 reference는 glass 기판으로 설정하여 OMO 투명전극만의 투과도를 측정하였다.

3.4 태양전지의 분석 방법

각 조건 별 OMO 투명전극을 BIPV 용 태양전지의 후면전극으로 적용하기에 적합한지를 확인하기 위하여 실리콘 박막 태양전지를 제작하고 그 특성을 분석하였다. 광이 투과가 되는 투광형 태양전지로 제작하였기 때문에 태양전지의 효율 분석뿐만 아니라 가시광선 영역의 투과도 또한 측정하였다.

3.4.1 태양전지의 효율분석

(1) 태양전지의 효율 분석 이론

태양전지의 효율을 결정하는 주요 파라미터는 단락전류 (Short circuit current, I_{sc}), 개방전압 (open circuit voltage, V_{oc}), 충전률 (Fill factor, FF)이 있다. 이는 solar simulator를 이용하여 측정하며 이를 통해 효율을 계산한다. Fig. 3.4은 특성곡선을 보여준다. V_{oc} 는 회로에 큰 저항이 걸려 광전류가 흐르지 않을 때 생성된 광 전압으로 전지에서 얻을 수 있는 깁스 자유 에너지(Gibbs free energy)이다. 높은 V_{oc} 를 얻기 위해서는 charge carrier의 확산 거리가 가급적 커야 하며, donor와 acceptor의 도핑농도가 가능한 커야 한다. grain의 크기가 작은 박막은 그 두께가 가급적 작아야 한다.

I_{sc} 는 회로가 단락된 상태에서 나타나는 전류밀도이며, 이 값은 우선으로 입사 광의 세기와 파장분포에 따라 달라지지만 이러한 조건이 결정된 상태에서는 광흡수에 의해 여기된 전자와 정공이 재결합하여 손실되지 않고 얼마나 효과적으로 전지 내부에서 외부회로 쪽으로 보내어지는가에 의해 결정된다. 이때 재결합에 의한 손실은 재료의 내부 혹은 계면에서 일어날 수 있다. 가능한 모든 파장의 빛을 흡수하기 위해선 흡수층 물질의 밴드갭 에너지가 작을수록 유리하지만 그렇게 되면 개방전압도 함께 감소하게 되므로 적절한 밴드갭을 가진 재료가 필요하다.

전지에서 출력의 최적점은 그림에서 V_m/I_m 으로 표현되는 저항 최적점이다. 이때의 최대 출력은 V_m 과 I_m 의 곱인, $P_m=V_mI_m$ 으로 나타낸다. FF란 출력 P_m 과 V_{oc} ,

I_{SC} 의 비율로써, 전지의 성능을 나타내는 주요한 척도이다. Fill Factor라는 명칭은 전류-전압 특성곡선에서 사각형 $V_{OC} \times I_{SC}$ 의 얼마만큼이 최대효율 사각형 P_m 으로 채워지는가를 나타내는 데서 유래한다. 이론적으로 FF는 V_{OC} 의 함수이고, V_{OC} 가 높을수록 커지게 된다.

(2) 태양전지의 효율 측정 방법

측정된 J-V 결과에서 Fig. 3.4 와 같이 J_{SC} 와 V_{OC} , FF를 추출할 수 있으며 계산을 통하여 전력 변환 효율(power conversion efficiency)을 계산할 수 있다. 또한 J_{SC} 지점과 V_{OC} 지점에서 각각 기울기를 통하여 Shunt resistance(R_{shunt})와 series resistance (R_{series})를 계산할 수 있다. 제작된 실리콘 박막 태양전지에서 효율 측정에는 solar simulator (Oriel 300, Newport Co.)을 이용하였으며 source meter (Keithley2400)를 이용하여 AM1.5G의 광 아래에서 current density-voltage (J-V)를 측정을 하였다. 광을 조사할 때에는 정확한 전력 변환 효율 측정을 위하여 모든 샘플의 광 입사 방향에 셀 면적 크기와 같은 shadow mask을 부착하여 셀 면적에만 빛이 입사되도록 하였다.

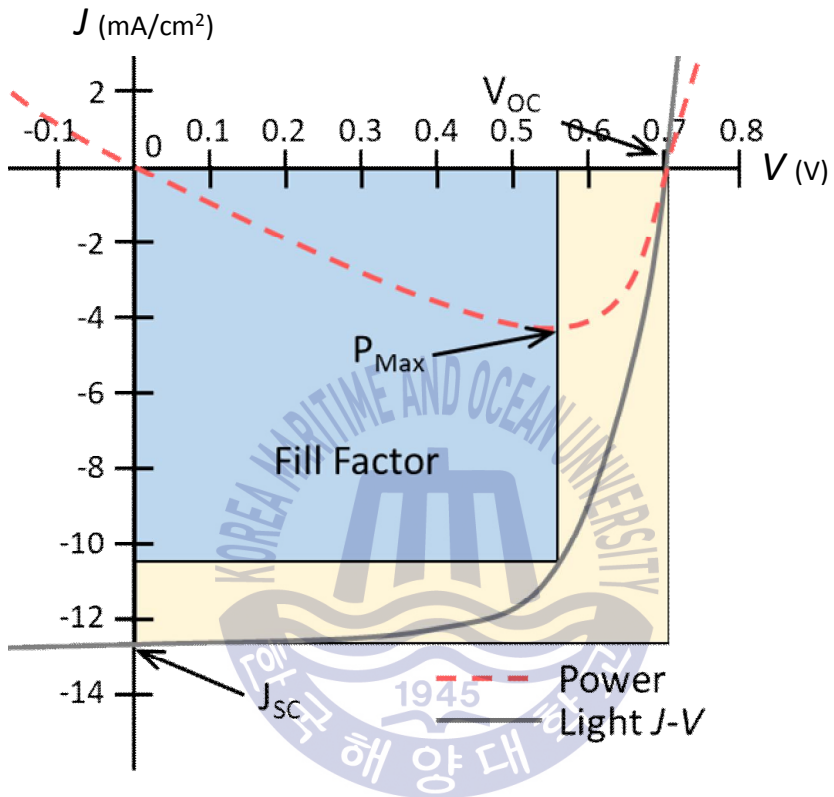


Fig. 3.4 J-V curve of solar cell and the characteristic parameters

3.4.2 광학적 특성

투광형 태양전지에 대한 광학적 특성 분석은 ultraviolet-visible spectrophotometer (UV-vis)를 사용한 투과도 측정으로 진행되었다. 가시광선 영역의 파장대인 300 - 800 nm에서 측정하였으며 reference는 air로 설정하여 기판을 포함한 태양전지 전체의 투과도를 측정하였다. 광은 셀의 태양광 입사 방향과 동일하도록 전면 glass 기판 방향으로 입사하도록 측정하였다.



제 4 장 결과 및 고찰

4.1 산소 유량에 따른 Ag, AgO_x OMO 전극

산소 주입에 의한 OMO 전극의 특성 변화는 AgO_x 증착 공정에서의 산소 주입 유량을 최적화시키는 과정과 금속 층 두께를 최적화 시키는 과정으로 나누어 연구하였다. 산소 유량에 따른 Ag, AgO_x의 OMO 전극에 대한 연구는 금속 층의 두께를 8 nm로 고정시키고 AgO_x의 reactive sputtering 공정에서의 산소유량을 0 - 5 sccm으로 변화시켜가며 진행하였다.

4.1.1 OMO 전극의 전기적, 광학적 특성 분석

산소 유량 별 AZO/Ag/AZO와 AZO/AgO_x/AZO 구조의 OMO 투명전극의 면저항 측정 결과를 Fig. 4.1에 나타내었다. OMO 전극의 면저항은 산소의 주입이 없는 Ag의 약 9 Ω/□에서 산소 유량이 3 sccm으로 증가하면 약 12 Ω/□까지 소폭 증가하고 5 sccm에서는 약 59 Ω/□으로 크게 증가하였다. 산소의 주입으로 인하여 전기전도도가 감소하는 것을 확인할 수 있으며 특히 5 sccm에서 두드러지게 나타난다.

동일한 OMO 투명전극 시료에 대하여 투과도를 측정하여 Fig. 4.2 에 나타내었다. 산소 주입이 없는 Ag에서 1 sccm까지는 투과도의 증가가 거의 나타나지 않다가 3 sccm이 되면 크게 증가하는 것이 관찰되었다. 이를 가시광선 영역인 500 - 800 nm 파장대에서 평균 값으로 보면 87.3 %에서 93.3 %로 크게 증가한 것을 알 수 있다. 이후 5 sccm이 되면 오히려 크게 감소하는 모습을 보인다.

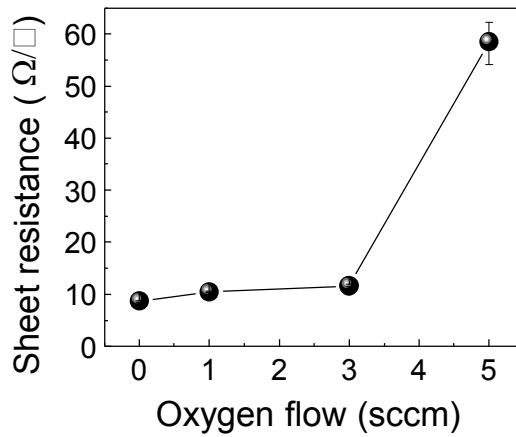


Fig. 4.1 Sheet resistance of AgO_x-based OMO electrodes as a function of the variation of O₂ flow rate

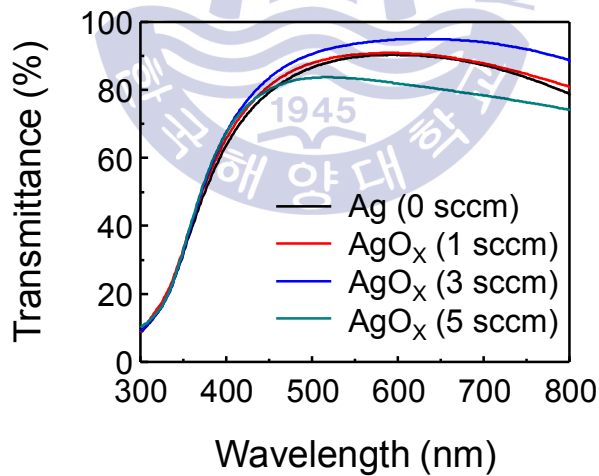


Fig. 4.2 Transmittance of AgO_x-based OMO electrodes as a function of the variation of O₂ flow rate

4.1.2 Ag, AgO_x 박막의 특성 분석

산소 유량에 따른 OMO 투명전극 특성 변화를 이해하기 위하여 glass/AZO/Ag와 glass/AZO/AgO_x 구조에서 XRD 측정을 진행하였고 결과를 Fig. 4.3에 나타내었다. AZO 50 nm 박막 위에 제작되어 모든 시료에서 ZnO의 peak가 나타났다. 모든 시료에서 금속 Ag의 다결정 peak가 나타났고 main peak는 38.3 °에서 (111) 방향으로 관찰되었다. 0 sccm에서 Ag의 peak이 가장 강하였고 산소의 유량이 증가할수록 peak의 intensity가 점차적으로 감소하였다. 또한 3 sccm에서부터 Ag₂O의 peak이 관찰되었다. 이것으로 보아 Ag의 막에 소량의 Ag₂O가 존재하면 Ag의 전기전도도와 Ag₂O의 반사도 감소를 함께 얻을 수 있는 것으로 보인다. 또한 5 sccm에서는 Ag의 peak이 거의 사라지는데 이는 이전에 확인되었던 면저항의 급격한 증가의 설명이 된다. 그리고 AgO_x는 산화 정도에 따라 밴드갭이 2.25 eV까지 증가한다고 알려져 있다. 이는 5 sccm에서 나타난 투과도 감소가 밴드갭이 변화된 AgO_x 박막에 의해 광 흡수가 일어난 것일 수 있음을 의미한다.

이러한 결정성의 변화는 Ag 특유의 island 형태의 성장모드에 영향을 줄 것으로 생각할 수 있고, 이는 OMO 전극의 중요 요소인 금속 층 표면 형상을 결정하게 된다. 이를 확인하기 위하여 glass/AZO/Ag와 glass/AZO/AgO_x 구조에서 AFM을 이용하여 표면 형상을 분석하였다. Fig. 4.4는 측정된 AFM 이미지를 나타내었다. Ag의 형상을 보면 명확한 Ag island의 경계가 관찰되며 거칠기 또한 1.37 nm로 높게 나타났다. 반면 모든 AgO_x 박막은 상대적으로 편평한 형상을 보이고 0.74 nm까지 감소된 거칠기를 가진다. 이는 산소의 주입이 금속 층을 연속적인 박막으로 형성하게 하는 것으로 보인다.

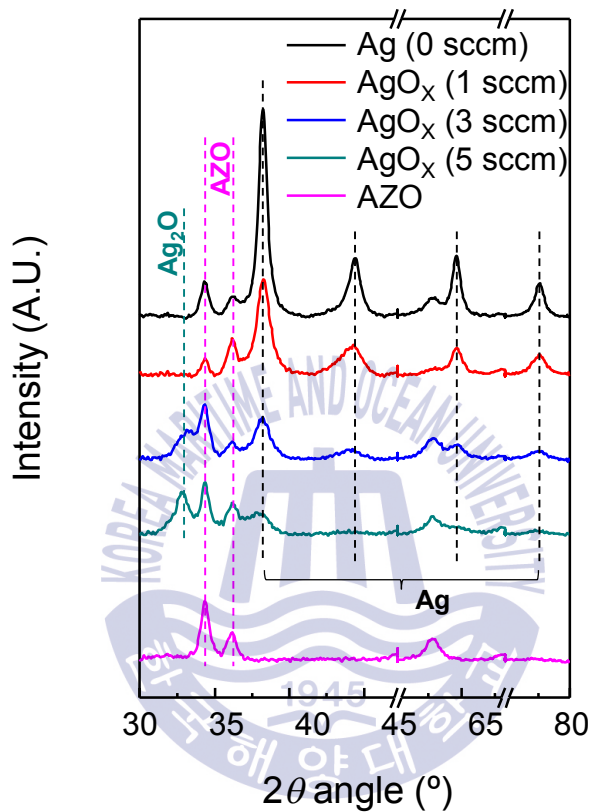


Fig. 4.3 Crystallographic characteristics of AgO_x films as a function of the variation of O₂ flow rate

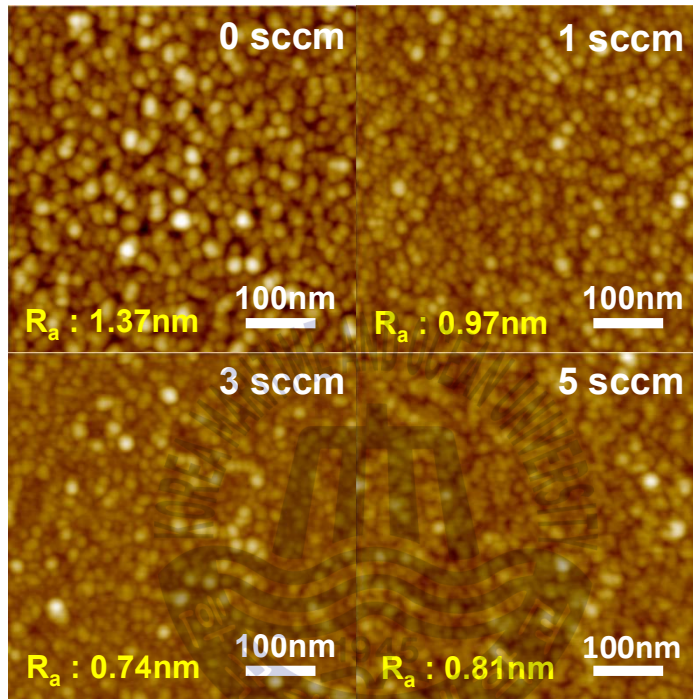


Fig. 4.4 Atomic force microscopy images ($1 \times 1 \mu\text{m}^2$) and root mean square average of roughness of the AgO_x films

4.1.3 Ag, AgO_x OMO가 적용된 태양전지의 특성

(1) 태양전지의 효율 분석

AgO_x OMO 투명전극이 BIPV용 태양전지에 적합한지 확인해보기 위하여 투명전극을 실리콘 박막 태양전지의 후면 전극으로 적용하였다. Fig. 4.5(a)는 각 조건별 OMO 전극이 적용된 실리콘 박막 태양전지의 J-V curve를 비교한 그래프이며 Fig. 4.5(b)는 셀 파라미터들을 다시 요약한 그래프이다. Ag를 사용한 셀에서는 효율(η)이 5.5 %, J_{sc} 는 10.2 mA/cm², FF는 67 %, V_{oc} 는 0.80 V로 나타났다. 3 sccm까지는 산소의 유량이 증가하여도 효율은 거의 변화하지 않고 5 sccm이 되면 크게 감소하는 결과가 나타났다. 이는 FF의 큰 감소가 영향이 주도적이었으며 J_{sc} 도 소폭 감소를 하였다. V_{oc} 는 0.01V 정도의 무시할만한 차이를 보였다.

이러한 FF의 변화요인을 분석하기 위하여 셀의 저항요소를 정리하여 Fig. 4.6에 나타내었다. FF는 series 저항과 shunt 저항에 의하여 결정되는데 여기서는 동일한 활성층으로 인해 shunt 저항보다 series 저항에 크게 영향을 받았다. series 저항은 소자의 직렬저항을 의미하며 이는 양단의 전극의 저항을 포함한다. 결국 OMO 전극의 면저항 증가는 셀의 series 저항의 증가로 이어졌고, 이는 FF를 감소시켰다. 또한 후면전극의 전도도 감소는 전자수송을 방해하여 J_{sc} 감소 또한 유도할 수 있다.

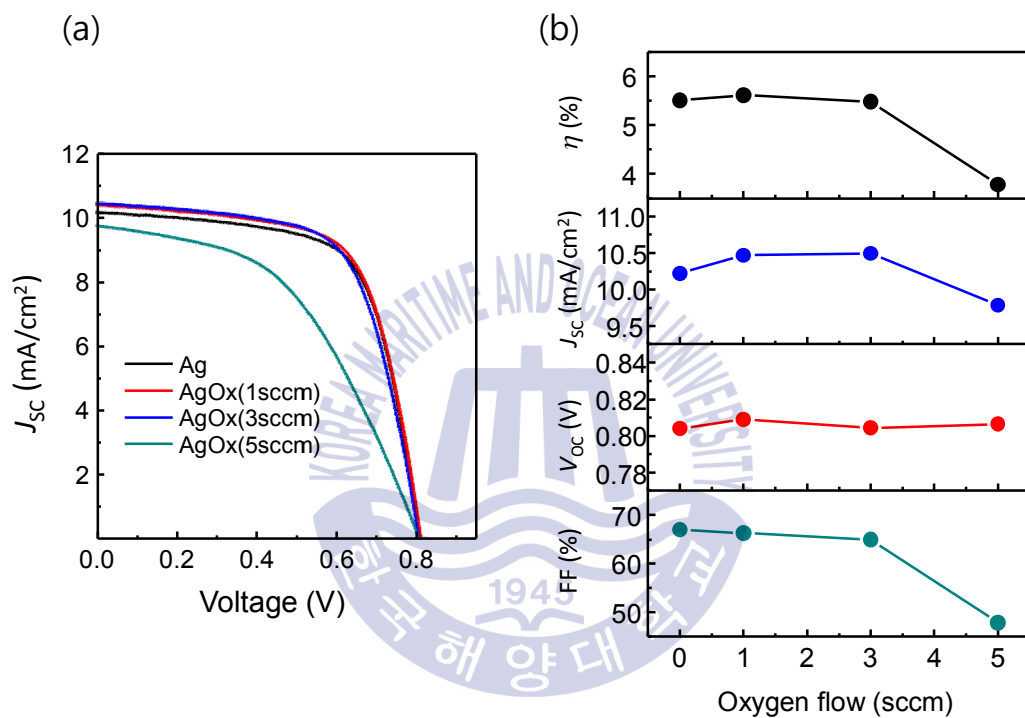


Fig. 4.5 Performance characteristics of silicon thin film solar cells. (a) J-V characteristics and (b) variations of cell performance parameters: efficiency (η), short-circuit current density (J_{sc}), open-circuit voltage (V_{oc}), and fill factor (FF).

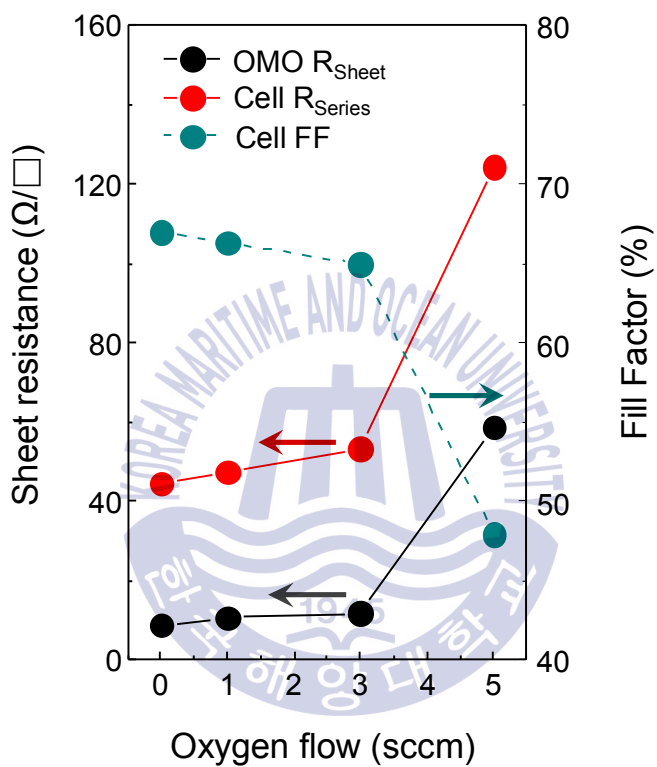


Fig. 4.6 Electrical characteristics of AgO_x based OMO electrodes comprising sheet resistance (R_{sheet}) of the electrodes, series resistance (R_{Series}) of the cells, and fill factor (FF) of the cells.

(1) 태양전지의 투과도 분석

Fig. 4.7(a)는 Ag와 AgO_x OMO 투명전극이 적용된 태양전지의 투과도 곡선을 보여주고 있다. 700 nm 이하의 파장대에서 실리콘 박막에 의한 광흡수가 일어나 급격한 투과도가 감소가 나타나며 500 nm 부근에서 0으로 수렴한다. 가시광선 파장대인 500 - 800 nm에서 광 투과가 일어나며 0 sccm인 Ag에서 3 sccm이 되면서 큰 투과도 향상을 보인다. 그리고 5 sccm이 되면 다시 감소하게 되는데 이는 단일 OMO 투명전극에서 나타난 결과와 동일한 경향을 보이는 것으로 보아 전극의 투과도 향상이 태양전지의 투과도 향상에 직접적으로 이어진 것임을 알 수 있다. 500 - 800 nm 파장대의 평균 값으로 비교하면 0 sccm에서 18.8 %이며 3 sccm에서는 21.9 %로 3 %의 향상이 나타났다. 향상된 투과도의 이해를 돕기 위해 Fig. 4.7(b)에 광학 이미지를 나타냈다.

제작된 태양전지는 BIPV를 위한 투광형 태양전지로서 그 투과도와 효율 두 가지 모두 중요한 요소이다. 이러한 투광형 태양전지의 성능평가를 위하여 Figure of Merit라는 평가지수가 존재하며 $FOM = T_{500-800} \times \eta$ 의 식으로 계산된다. [26, 37] 여기서 $T_{500-800}$ 은 가시광선 영역인 500 - 800 nm의 평균 투과도를 의미하며 η 는 효율을 뜻한다. 투광형 태양전지의 figure of merit를 Table 4.1에 나타냈다. 그 결과 Ag OMO 전극을 사용한 태양전지보다 3 sccm의 AgO_x OMO 전극이 적용된 태양전지의 성능이 약 16.5 % 증가한 것으로 나타났다.

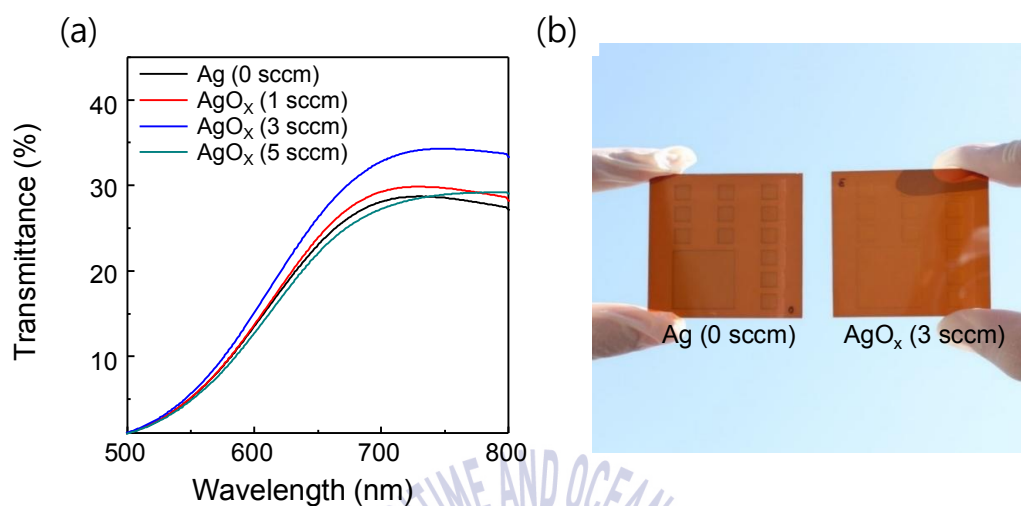


Fig. 4.7 (a) Transmittance of silicon thin film solar cells as a function of the variation of O₂ flow rate and (b) actual fabricated cells

O ₂ flow rate (sccm)	$T_{500-800}$ (%)	η (%)	Figure of merit (%)
0	18.8	5.50	103.5
1	19.4	5.61	108.9
3	21.9	5.48	120.0
5	18.5	3.78	69.9

Table. 4.1 Comparison of the performance parameters for the silicon thin film solar cells : average transmittance in the wavelength range of 500-800 nm ($T_{500-800}$), efficiency(η) and figure of merit

4.2 금속 층 두께에 따른 Ag, AgO_x OMO 전극

최적의 조건으로 밝혀진 3 sccm의 산소 유량을 바탕으로 금속 층 두께에 따른 OMO 투명전극의 특성을 알아보기로 하였다. 0 sccm인 Ag 금속 층을 reference로 함께 제작하여 그 특성을 비교하였다.

4.2.1 OMO 전극의 전기적, 광학적 특성 분석

(1) 전기적 분석

AZO/Ag/AZO와 AZO/AgO_x/AZO 구조의 OMO 투명전극에서 Ag 및 AgO_x 층의 두께를 2 - 10 nm로 변화시키며 면저항 측정을 진행하였고 그 결과를 Fig. 4.8(a)에 나타내었다. 4 nm까지의 두께에서는 두 OMO 전극 모두 매우 큰 면저항을 보여주었으며 6 nm에서부터 크게 감소하는 것을 볼 수 있다. 또한 6 nm의 두께까지 AgO_x를 사용한 OMO 전극의 면저항이 18.7 Ω/□로 Ag를 사용한 OMO 전극의 19.8 Ω/□보다 오히려 더 낮게 나타났다가 8 nm에서 역전되는 현상이 나타났다. 여기서 금속 층의 비저항만을 분석하고자 아래의 병렬회로 저항 식을 이용하였다.

$$\rho_{metal} = \frac{d_{metal}}{(1/R_{OMO}) - 2(d_{AZO}/\rho_{AZO})}$$

계산된 금속 층의 비저항을 Fig. 4.8(b)에 나타내었다. 그 결과 AgO_x는 6 nm에서, Ag는 8 nm에서 수렴하는 모습을 보였으며 수렴하는 박막의 비저항은 Ag가 AgO_x보다 더 낮게 나타났다. 이를 통해 금속 층이 연속적인 박막을 형성해 percolation되는 두께가 각각 Ag에서는 8 nm, AgO_x에서는 6 nm임을 추측할 수 있다.

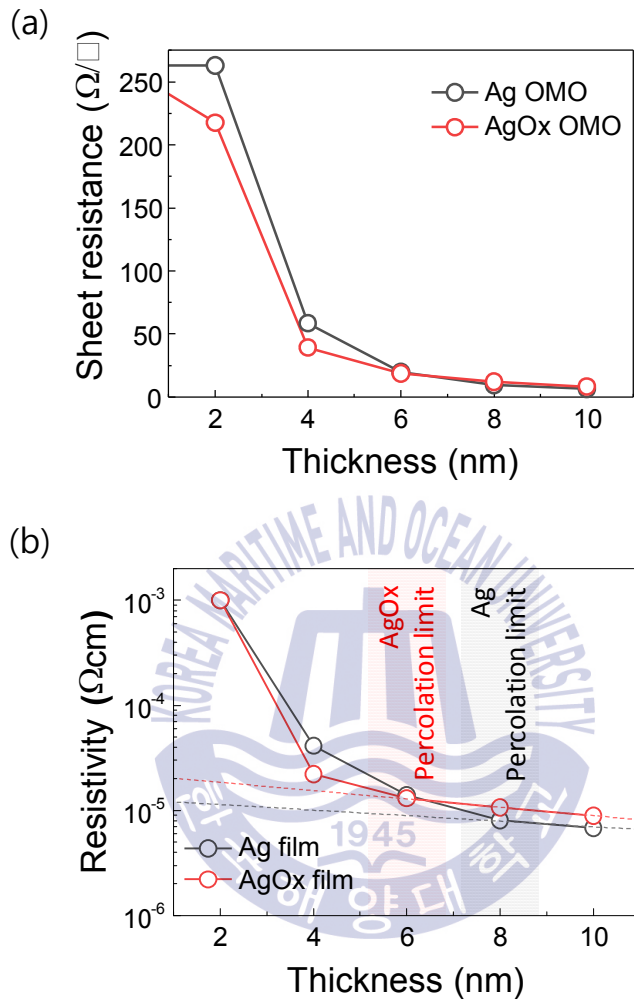
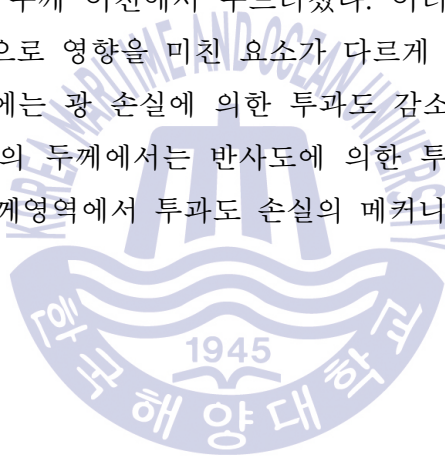


Fig. 4.8 Electrical characteristics of Ag and AgO_x comprising (a) sheet resistance of Ag- and AgO_x-based OMO electrodes and (b) calculated resistivity of single Ag and AgO_x thin films

(2) 광학적 분석

Ag와 AgO_x에 두께에 따른 OMO 전극의 광학적 특성변화를 조사하기 위하여 투과도와 반사도를 측정하였다. 투과도와 반사뿐만이 아니라 OMO 전극에서 생기는 광 손실(optical loss)을 $\text{Optical loss} = 100 \% - (T + R)$ 로 계산하여 함께 조사하였다. 먼저, 두께에 따른 투과도 경향을 확인하기 위해서 500 - 800 nm 파장대의 평균 값으로 계산된 투과도와 반사도, optical loss를 두께 변수로 정리하여 Fig. 4.9에 나타내었다. OMO 전극의 투과도는 Ag와 AgO_x의 두께가 각각 8, 6 nm일 때에 가장 투과도가 높았으며 이는 percolation 임계두께와 일치한다. Ag OMO에 비하여 AgO_x OMO의 투과도는 전체적으로 크게 향상된 모습을 보였고 특히 8 nm 두께 이전에서 두드러졌다. 이러한 투과도는 금속 층의 두께에 따라서 주도적으로 영향을 미친 요소가 다르게 나타났다. 각 금속 층의 임계두께 이전의 두께에는 광 손실에 의한 투과도 감소가 상대적으로 큰 비중을 차지하였으며, 이상의 두께에서는 반사도에 의한 투과도 감소가 크게 나타났다. 이는 두 가지 두께영역에서 투과도 손실의 메커니즘이 다를 것을 의미한다.



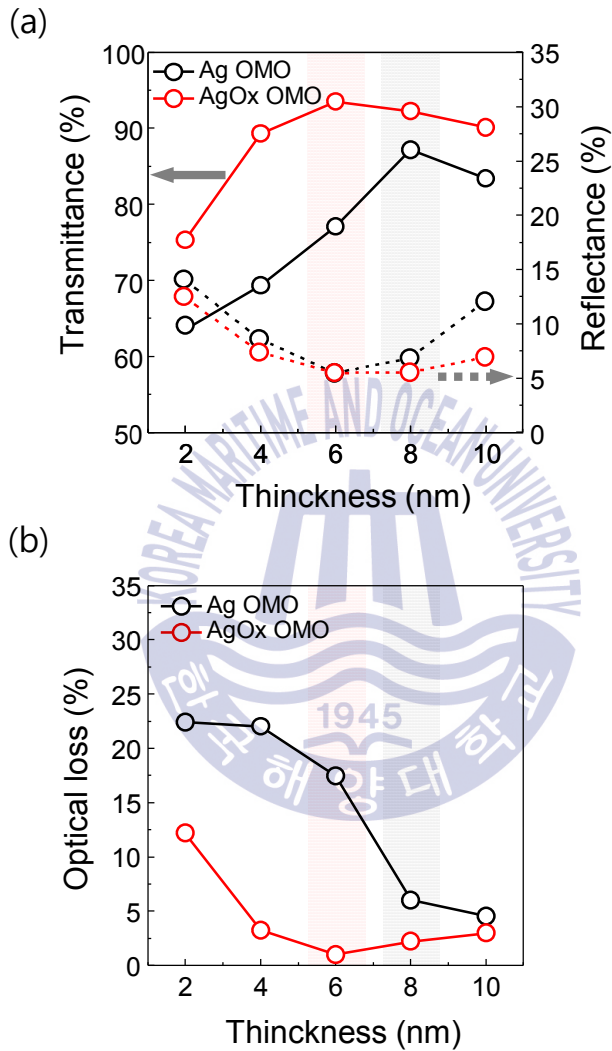


Fig. 4.9 Optical characteristics of Ag- and AgO_x-based OMO electrodes as function of metal layer thickness : average value of (a) transmittance and reflectance and (b) optical loss in the wavelength range of 500 - 800 nm

두 가지 투과도 손실 메커니즘을 분석하기 위해서 측정된 투과도, 반사도, optical loss를 다시 파장대별로 Fig. 4.10에 나타냈다. 모든 시료에서 400 nm 이하의 파장대에 강한 광 손실이 나타나는데, 이는 AZO 박막에 의한 광흡수로 인해 나타난 결과이다. Ag OMO에서는 Ag의 두께가 8 nm 이상일 때에는 500 - 650 nm 파장대에서 높은 투과도를 보여주며 그 이상의 장파장대 영역에서는 큰 투과도 감소가 일어난다. 이는 같은 파장대에서 증가한 반사도에 의해 결정되었는데 이러한 현상은 박막 형태의 Ag의 높은 가시광선 - 근적외선 영역의 반사현상으로 잘 알려져 있다. 반면 AgO_x OMO에서는 percolation 임계두께인 6 nm 이상에서도 장파장대 반사가 크게 감소한 것을 볼 수 있다. 이는 AgO_x 박막의 반사율이 Ag 박막보다 낮음을 의미한다.

Ag의 두께가 6 nm 이하일 때에 450 nm 파장대 이상에서 큰 투과도 감소가 일어나고 800 nm 파장대 부근에서는 투과도 감소가 나타나지 않았다. 이는 증가한 optical loss에 의해 결정되었다. 이는 island 형태의 금속 파티클 사이에서 발생하는 grain boundary scattering과 plasmonic 현상에 의한 광흡수 때문으로 보이며 장파장대의 광 투과는 island 형태 금속 박막의 특징으로 알려져 있다 [38]. 하지만 AgO_x를 사용한 OMO 전극에서는 2 nm를 제외한 모든 두께에서 크게 낮은 광손실을 가진다. 이러한 결과를 바탕으로 광 손실 메커니즘 분석을 위해 Ag와 AgO_x 박막을 체계적으로 조사하였다.

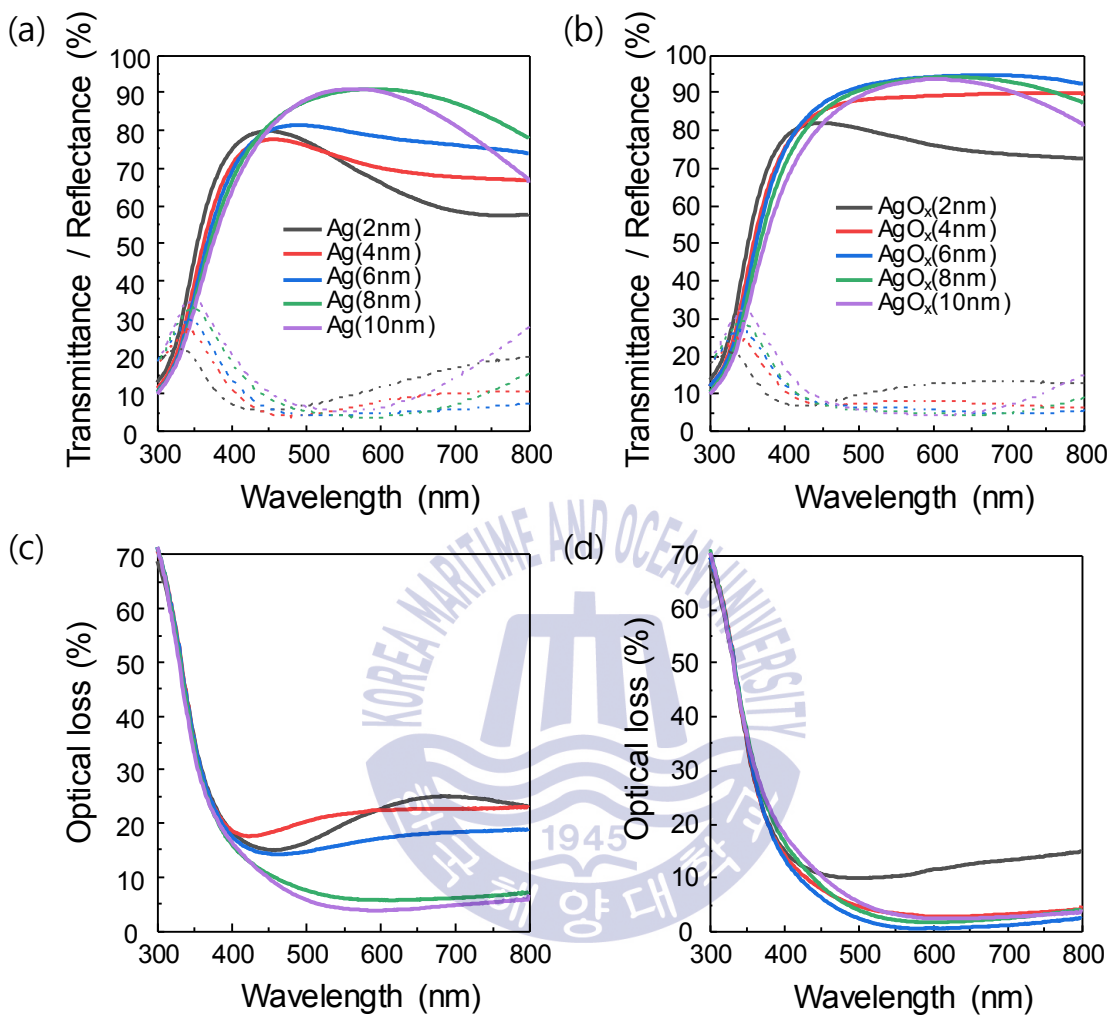


Fig. 4.10 Optical characteristics of Ag- and AgO_x-based OMO electrodes as function of metal layer thickness : measured curve of (a), (b) transmittance (line) and reflectance (dot) and (c), (d) optical loss

4.2.2 Ag, AgO_x 박막의 특성 분석

(1) 표면 형상 및 거칠기 분석

이전의 산소 유량에 따른 AgO_x 박막의 표면 형상 특성에서 나타났듯이 산소의 주입은 Ag의 island 형태의 성장을 억제할 수 있었다. 금속 층의 성장 모드와 관련이 깊은 percolation 임계 두께를 정밀하게 분석하기 위해서 glass/AZO/Ag와 glass/AZO/AgO_x 구조에서 금속 층 두께별로 AFM을 이용하여 표면형상 분석과 거칠기를 측정하였다.

Fig. 4.11에 나타난 초기 성장 두께인 4 - 6 nm 두께 박막의 표면형상을 보면 Ag 박막에서는 명확한 island 구조가 관찰되는 것을 알 수 있다. 반면 AgO_x 박막에서는 비교적 island가 관찰되지 않으며 특히 6 nm에서는 매우 편평한 모습을 보인다. 이는 전자의 이동 경로를 연장하여 6 nm에서 AgO_x 박막의 비저항이 Ag 박막의 비저항보다 낮은 이유가 된다. 이러면 표면형상의 변화는 거칠기 경향에 직접적으로 나타나게 된다. Fig. 4.12는 Ag와 AgO_x의 박막을 두께 변수로 거칠기를 계산한 결과이다. 전체적으로 AgO_x의 거칠기가 Ag보다 약 0.2 nm 씩 낮았지만 그 차이는 특히 초기성장 두께인 6 nm이하에서 0.6 nm로 두드러지게 나타났다.

이러한 표면형상 및 거칠기 분석 결과는 Ag의 두께가 percolation 임계두께보다 얇을 때에 나타난 큰 광 손실이 island 구조 및 거친 표면에서 오는 grain boundary scattering 및 플라즈모닉 효과에 의한 광 흡수임을 증명한다.

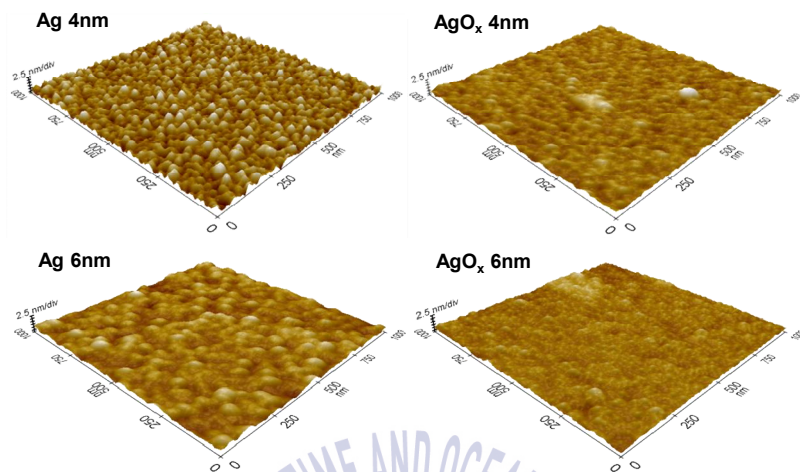


Fig. 4.11 3D images of atomic force microscopy ($1 \times 1 \mu\text{m}^2$) of Ag and AgO_x thin films at the initial growth thickness (2 - 4 nm)

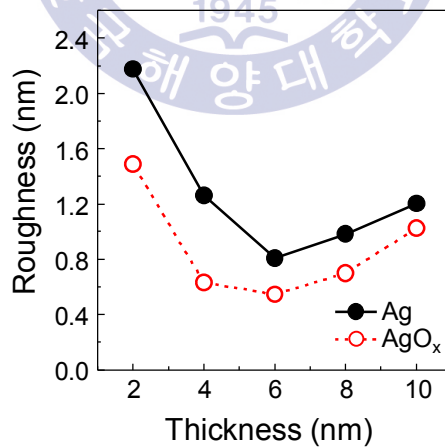


Fig. 4.12 Calculated roughness value of Ag and AgO_x films as function of metal layer thickness

(2) 접촉각 측정

Ag와 AgO_x 박막의 percolation 임계 두께 차이 및 표면 형상 특성의 변화 원인을 조사하기 위해서 접촉각 측정을 하였다. 강한 금속 결합을 하는 Ag의 특성으로 인해 seed 층이나 도핑으로 표면에너지를 조절하여 percolation 임계두께를 감소시키기 위한 연구들은 보고되어져 왔었다. 여기서 우리는 산소 주입으로 인한 박막 특성 변화가 표면에너지에 의한 것인지 분석하고자 한다. 시료는 glass/AZO/Ag와 glass/AZO/AgO_x 구조에서 금속 층 두께를 10 nm로 제작하여 측정하였고 그 결과를 Fig. 4.13에 나타내었다. Ag 박막에서는 70.7 °로 나타났으며 AgO_x 박막에서는 크게 감소한 47.5 °로 측정되었다. 이는 상대적으로 Ag 박막의 소수성, AgO_x 박막의 친수성을 의미하며 이는 주입된 산소가 Ag의 금속 결합을 끊어 표면에너지가 높아졌음을 뜻한다. 이는 AgO_x 박막이 더 얇은 두께에서 연속적인 박막 형성을 가능하게 한다.



Fig. 4.13 Water contact angle image and measured angle of Ag and AgO_x thin film

(3) 굴절률(n)과 흡광계수(k) 분석

금속 층 두께가 두꺼울 때 Ag OMO와 AgO_x OMO에서 나타난 반사도 차이 및 심화된 광학 특성 분석을 위하여 굴절률과 흡광계수를 측정하여 Fig. 4.14에 나타냈다. Ag 박막은 0에 가까운 굴절률을 나타냈고 AgO_x는 산소 주입으로 약 1로 크게 증가하였다. 이는 약 2의 굴절률을 가진 AZO 박막 사이에서 광학 임피던스 매칭의 향상을 가져오며 이는 반사도 감소를 설명할 수 있다. 또한, Ag 박막은 금속 Ag의 특성으로 높은 흡광계수를 가지며 산소가 주입된 AgO_x는 크게 감소한 모습을 보인다. 이는 산소 주입이 금속 층에 의한 광 흡수를 줄이는 데에 기여했을 것으로 생각된다.



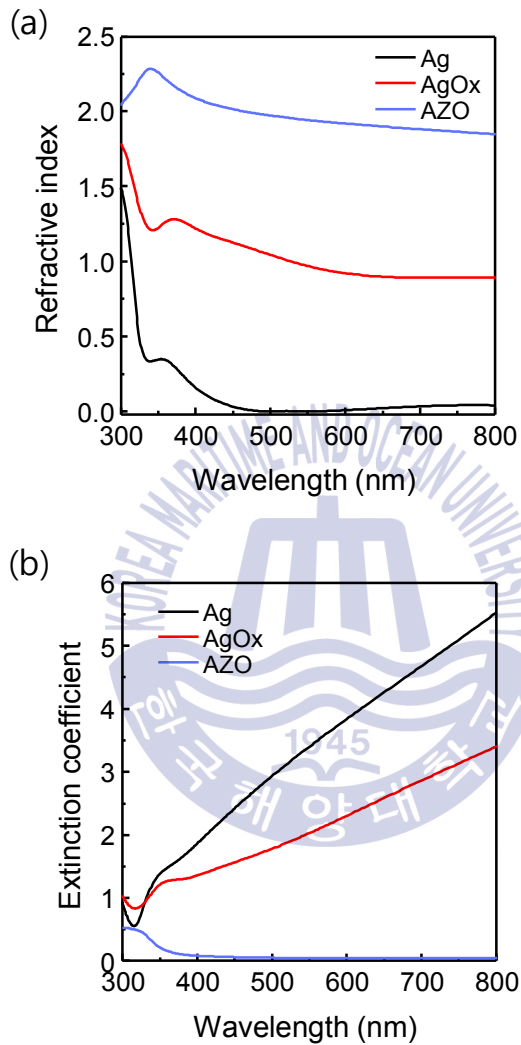


Fig. 4.14 Optical properties of Ag, AgO_x and AZO materials (a) refractive index and (b) extinction coefficient

4.2.3 Ag, AgO_x OMO가 적용된 태양전지의 특성

(1) 태양전지의 효율 분석

AgO_x OMO 투명전극에서 BIPV용 태양전지에 가장 적합한 금속 층 두께를 확인해보기 위하여 금속 층 두께를 변수로 투명전극을 실리콘 박막 태양전지의 후면 전극으로 적용하였다. 마찬가지로 Ag OMO를 적용한 태양전지를 reference로 함께 제작하여 비교하였으며 두께는 4 - 10 nm로 설정하였다. Fig. 4.15는 금속 층 두께별 OMO 전극의 실리콘 박막 태양전지의 J-V curve 측정 결과와 셀 파라미터들의 요약을 보여준다. 금속 층의 두께가 8 nm 이상일 때에는 효율이 5.5 ~ 5.7 %로 효율이 거의 비슷하지만 Ag OMO를 사용하였을 때에 소폭 크게 나타났다. 이는 Ag의 반사로 인하여 J_{sc}가 소폭 증가했기 때문으로 보인다. 하지만 금속 층의 두께가 6 nm로 감소하면 Ag OMO를 사용한 태양전지의 효율은 4.3 % 급격하게 감소를 하는 반면 AgO_x OMO를 사용한 태양전지의 효율은 5.1 %로 점차적인 감소를 보인다. 이러한 효율 감소에 영향을 준 것은 산소 유량 별 실험에서와 마찬가지로 FF가 가장 주도적이었다. 이는 OMO 전극의 면저항 결과와 동일한 경향을 보였다. 또한, 금속 층 두께가 감소함에 따라 모든 셀에서 J_{sc}가 전극의 전도도 감소로 인해 소폭 감소하였으며 V_{oc}는 전체 셀에서 거의 동일하게 나타났다.

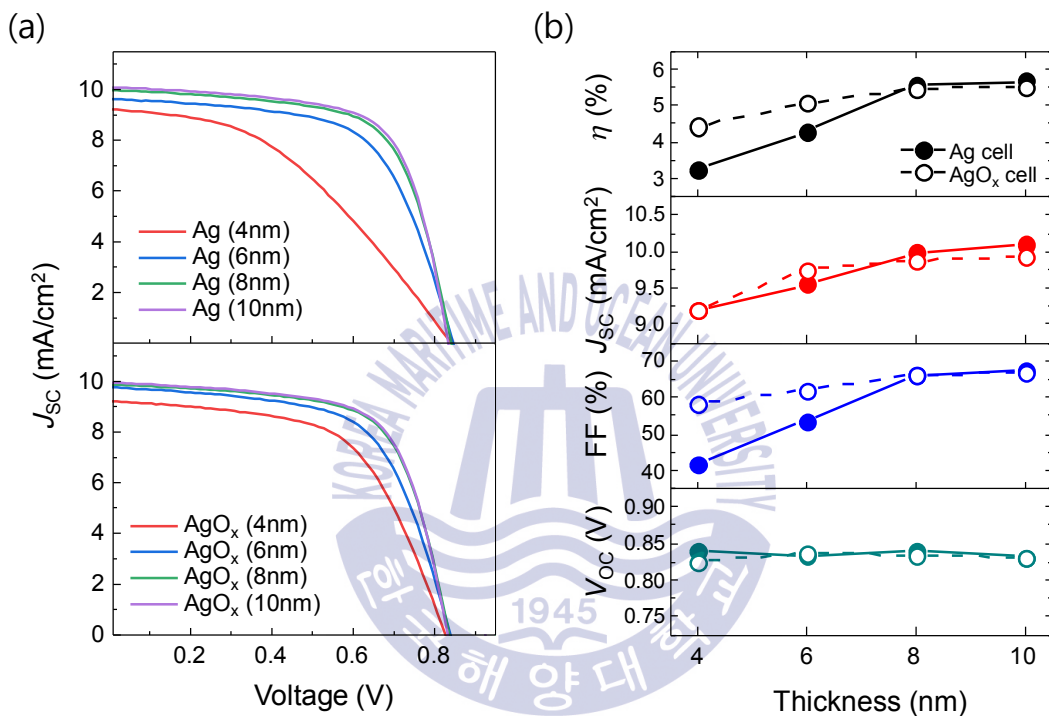


Fig. 4.15 Performance characteristics of silicon thin film solar cells using Ag- and AgO_x-based OMO electrodes. (a) J-V characteristics and (b) variations of cell performance parameters: efficiency (η), short-circuit current density (J_{sc}), open-circuit voltage (V_{oc}), and fill factor (FF)

(2) 태양전지의 광학적 특성 분석

제작된 Ag, AgO_x OMO 태양전지의 가시광선 투과도를 측정하였고 그 투과도 곡선을 Fig. 4.16에 나타내었다. Ag OMO를 적용한 태양전지는 4, 6 nm 두께에서 island 박막 특성인 전파장대에 걸친 광 손실과 장파장대(700 - 800 nm) 광 투과가 관찰되었고 이는 단일 OMO전극의 투과도 특성과 동일하였다. 반면, 이러한 특성은 AgO_x OMO를 적용한 태양전지에서는 전혀 나타나지 않았다. 금속 층으로 AgO_x를 사용하였을 때에 Ag에 비하여 투과도가 전체적으로 크게 향상되었고 최고 투과도는 각각 Ag OMO를 사용할 때에 8 nm에서 18.89 %, AgO_x OMO를 사용할 때에 6 nm에서 27.78 %로 8.9 %의 큰 차이를 보였다. 이는 percolation 임계 두께의 감소뿐만 아니라 산소 주입으로 인한 반사도 감소가 가시광선 투과를 크게 향상시킬 수 있었던 것으로 보인다.

최대 효율은 Ag OMO를 사용한 태양전지에서 높았고 최대 투과도는 AgO_x OMO를 사용한 태양전지에서 높았기 때문에 객관적인 성능평가를 위해 이전 실험과 마찬가지로 투광형 태양전지의 figure of merit를 계산하였다. 각 셀에서의 효율과 가시광선 영역 평균 투과도, FOM 계산 결과를 Table. 4.2에 나타내었다. Ag를 사용하였을 때에 가장 높은 FOM은 8 nm에서 104.63 % 였으며 AgO_x를 사용하였을 때에는 6 nm에서 140.83 %로 36.2 %의 성능향상이 확인되었다.

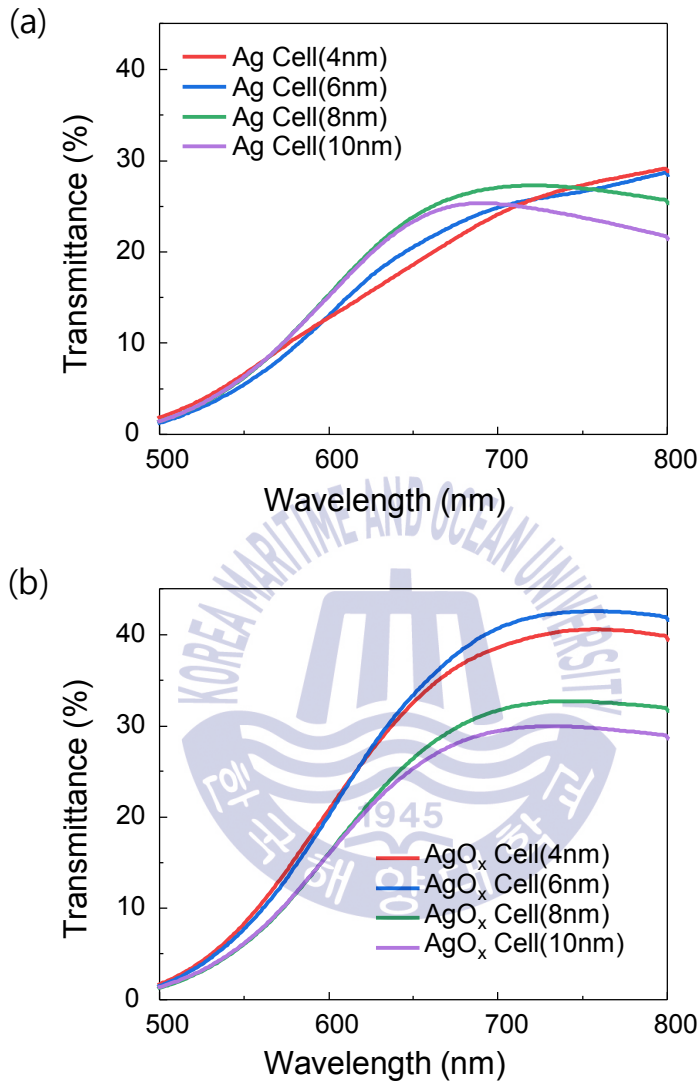


Fig. 4.16 Transmittance of silicon thin film solar cells as a function of the metal layer thickness using (a) Ag-based OMO electrodes and (b) AgO_x-based OMO electrodes

Metal layer	Metal layer thickness (nm)	η (%)	$T_{500-800}$ (%)	Figure of merit (%)
Ag	4	3.25	17.61	57.24
	6	4.27	17.53	74.85
	8	5.54	18.89	104.63
	10	5.66	17.63	99.79
AgO _x	4	4.44	27.00	119.88
	6	5.07	27.78	140.83
	8	5.47	21.63	118.32
	10	5.51	20.37	112.24

Table 4.2 Comparison of the performance parameters for the silicon thin film solar cells as a function of thickness of Ag and AgO_x films : average transmittance in the wavelength range of 500–800 nm ($T_{500-800}$), efficiency(η) and figure of merit

제 5 장 결론

본 논문에서는 산소를 주입한 AgO_x 박막을 OMO 투명전극의 금속 층으로 적용하여 AZO/ AgO_x /AZO 구조의 투명전극을 연구하였다. AgO_x 박막과 이를 금속 층으로 사용한 OMO 전극에 대해서 크게 2가지로 나누어 연구하였다. 먼저, AgO_x 박막 증착을 위한 reactive sputtering 공정 중 주입하는 산소 유량을 변수로 하여 OMO 전극 성능과 AgO_x 박막의 물질 특성을 분석하였다. 다음으로 금속 층의 두께를 변수로 다시 OMO 전극의 성능을 분석하고 그 원인 분석을 진행하였으며, 객관적인 비교를 위해 Ag 박막을 이용한 OMO 전극을 함께 분석하였다. 제작된 OMO 전극들을 실리콘 박막 태양전지에 적용하여 투광형 태양전지에서의 특성도 확인하였다.

금속 층의 두께를 고정하고 산소 유량을 변수로 AgO_x OMO를 제작하였을 때, 전극의 성능은 3 sccm의 산소유량에서 최적화 되었으며, 전기전도도의 손실 없이 투과도 향상을 이루었다. 그 면저항은 $12 \Omega/\square$ 이었으며, 500 - 800 nm 파장대의 투과도 평균은 93.3 %이었다. 이는 금속 Ag의 금속-유전체 상전이 중간에서 Ag와 AgO_x 의 전기적, 광학적 특성을 모두 얻을 수 있었기 때문으로 분석되었다. 또한 산소 주입에 따라 금속 층의 표면 형상 변화를 확인할 수 있었다. 이러한 AgO_x OMO를 실리콘 박막 태양전지에 적용시켰을 때에 효율은 손실 없었으며 투과도는 향상시킬 수 있었다. 성능평가를 위하여 FOM을 계산하였을 때에 Ag OMO 태양전지보다 16.5 % 향상된 120.0 %의 FOM을 보여주었다.

3 sccm으로 최적화된 산소 유량을 바탕으로 금속 층 두께에 따른 AgO_x OMO와 Ag OMO를 분석한 결과 최적의 두께는 각각 6, 8 nm로 확인되었다. 이는 산소 주입으로 인한 AgO_x 박막의 표면에너지 변화로 박막 성장 형태가 달라졌기 때문이다. 박막 성장 형태의 변화는 percolation 두께를 감소로 이어졌으며 더 얇은 두께의 금속 층을 실현할 수 있었다. 또한 grain boundary scattering 감소와 광학 임피던스 매칭으로 인해 우수한 광학적 특성을 지닌 OMO 전극을 제작할 수 있었다. 각각의 OMO 전극을 실리콘 박막 태양전지에 적용시켰을 때 Ag에 비해 더 얇은 금속 층 두께에서도 0.37 %의 적은 효율 감소로 8.9 %의

큰 투과도 향상을 달성하였다. FOM를 적용시켰을 때에 Ag OMO 태양전지에 비하여 36.2 % 향상된 결과를 얻을 수 있었다.

본 연구에서 금속 층 물질로 제안한 AgO_x 는 기존의 Ag를 사용한 OMO 전극의 투과도 감소를 개선할 수 있었고 투광형 태양전지의 성능을 향상시켰다. 이를 통하여 oxide/ AgO_x /oxide 구조의 투명전극을 차세대 BIPV 태양전지용 투명전극으로 제시한다.



참고문헌

1. Aguas, H., Ram, S.K., et al., 2011. Silicon thin film solar cells on commercial tiles. *Energy Environ. Sci.* 4, 4620–4632.
2. Lynn, N., Mohanty, L., Wittkopf, S., 2012. Color rendering properties of semi-transparent thin-film PV modules. *Build. Environ.* 54, 148–158.
3. Han, J., Lu, L., Yang, H., 2010. Numerical evaluation of the mixed convective heat transfer in a double-pane window integrated with see-through a-Si PV cells with low e coatings. *Appl. Energy* 87 (11), 3431–3437.
4. Yoon, J.H., Song, J., Lee, S.J., 2011. Practical application of building integrated photovoltaic (BIPV) system using transparent amorphous silicon thin-film PV module. *Sol. Energy* 85 (5), 723–733.
5. Minami, T., Sato, H., Imamoto, H., et al., 1992. Substrate temperature dependence of transparent conducting Al-doped ZnO thin films prepared by magnetron sputtering. *Jpn. J. Appl. Phys.* 31 (2), 3A.
6. Lyubchyk, A., Vicente, A., et al., 2016. Mapping the electrical properties of ZnO-based transparent conductive oxides grown at room temperature and improved by controlled postdeposition annealing. *Adv. Electron. Mater.* 2, 1500287.
7. Zhang, M., Fang, S., Zakhidov, A.A., Lee, S.B., et al., 2005. Strong, transparent, multifunctional carbon nanotube sheets. *Science* 309 (5738), 1215–1219.
8. Wu, Z., Chen, Z., Du, X., et al., 2004. Transparent conductive carbon nanotube films. *Science* 305 (5688), 1273–1276.
9. Hu, L., Hecht, D.S., Gruner, G., 2004. Percolation in transparent and conducting carbon nanotube networks. *Nano Letters* 4 (12), 2513–2517.
10. Avouris, P., Freitag, M., Perebeinos, V., 2008. Carbon-nanotube photonics and optoelectronics. *Nat. Photonics* 2, 341–350.
11. Bonaccorso, F., Sun, Z., Hasan, T., et al., 2010. Graphene photonics and optoelectronics. *Nat. Photonics* 4, 611–622.

12. Becerril, H.A., Mao, J., Liu, Z., et al., 2008. Evaluation of solution-processed reduced graphene oxide films as transparent conductors. *ACS Nano* 2 (3), 463–470.
13. Chang, H., Wang, G., Yang, A., et al., 2010. A transparent, flexible, low-temperature, and solution-processible graphene composite electrode. *Adv. Funct. Mater.* Sep. 20 (17), 2893–2902.
14. Leem, D.-S., Edwards, A., Faist, M., et al., 2011. Efficient organic solar cells with solution processed silver nanowire electrodes. *Adv. Mater.* Oct. 23 (38), 4371–4375.
15. Garnett, E.C., Cai, W., Cha, J.J., et al., 2012. Self-limited plasmonic welding of silver nanowire junctions. *Nat. Mater.* 11, 241–249.
16. Groep, J.V.D., Spinelli, P., Polman, A., 2012. Transparent conducting silver nanowire networks. *Nano Letters* 12 (6), 3138–3144.
17. De, S., Higgins, T.M., Lyons, P.E., et al., Jun. 2009. Silver nanowire networks as flexible, transparent, conducting films: extremely high DC to optical conductivity ratios. *ACS Nano* 3 (7), 1767–1774.
18. Theuring, M., Vehse, M., Maydell, K.V., et al., 2014. AZO-Ag-AZO transparent electrode for amorphous silicon solar cells. *Thin Solid Films* 558, 294–297.
19. Sahu, D.R., Lin, S.-Y., Huang, J.-L., 2007. Deposition of Ag-based Al-doped ZnO multilayer coatings for the transparent conductive electrodes by electron beam evaporation. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* 91 (9), 851–855.
20. Girtan, M., 2012. Comparison of ITO/metal/ITO and ZnO/metal/ZnO characteristics as transparent electrodes for third generation solar cells. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* 100, 153–161.
21. Yu, S., Li, L., Lyu, X., Zhang, X., et al., 2016. Preparation and investigation of nano-thick FTO/Ag/FTO multilayer transparent electrodes with high figure of merit. *Sci. Rep.* 6, 20399.
22. Schubert, S., Hermenau, M., Meiss, J., et al., 2012. Oxide sandwiched metal thin-film electrodes for long-term stable organic solar cells. *Adv. Funct. Mater.* 22 (23),

4993–4999.

23. Park, H.-K., Kang, J.-W., Na, S.-I., et al., 2009. Characteristics of indium-free GZO/Ag/GZO and AZO/Ag/AZO multilayer electrode grown by dual target DC sputtering at room temperature for low-cost organic photovoltaics. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* 93 (11), 1994–2002.
24. Cao, W., Zheng, Y., Li, Z., et al., Nov. 2012. Flexible organic solar cells using an oxide/metal/oxide trilayer as transparent electrode. *Org. Electron.* 13 (11), 2221–2228.
25. Jeong, J.-A., Kim, H.-K., 2009. Low resistance and highly transparent ITO–Ag–ITO multilayer electrode using surface plasmon resonance of Ag layer for bulk-heterojunction organic solar cells. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* 93 (10), 1801–1809.
26. Hyunjin Jo, Jo-Hwa Yang, Ji-hoon Lee, et al. 2018. Transparent bifacial a-Si:H solar cells employing silver oxide embedded transparent rear electrodes for improved transparency. *Solar Energy* 170, 940.946
27. Lide, D.R., 1997. *Handbook of Chemistry and Physics*. CRC Press, Boca Raton, FL. Lim, J.W., Lee, D.J., Yun, S.J., 2013. Semi-Transparent amorphous silicon solar cells using a thin p-Si layer and a buffer layer. *ECS Solid State Lett.* 2 (6), Q47–Q49.
28. Seal, K., Nelson, M.A., Ying, Z.C., et al., 2003. Growth, morphology, and optical and electrical properties of semicontinuous metallic films. *Phys. Rev. B.* 67, 035318.
29. Pierson, J.F., Wiederkehra, D., Billard, A., 2005. Reactive magnetron sputtering of copper, silver, and gold. *Thin Solid Films* 478 (1–2), 196–205.
30. Barik, U.K., Srinivasan, S., Nagendra, C.L., et al., 2003. Electrical and optical properties of reactive DC magnetron sputtered silver oxide thin films: role of oxygen. *Thin Solid Films* 429 (1–2), 129–134.
31. Abe, Y., Hasegawa, T., Kawamura, M., et al., 2004. Characterization of Ag oxide thin films prepared by reactive RF sputtering. *Vacuum* 76 (1), 1–6.

32. Al-Kuhaili, M.F., 2007. Characterization of thin films produced by the thermal evaporation of silver oxide. *J. Phys. D: Appl. Phys.* 40 (9), 2847.
33. Xi Yang, Pingqi Gao, Zhenhai Yang, et al. 2017. Optimizing ultrathin Ag films for high performance oxide-metal-oxide flexible transparent electrodes through surface energy modulation and template-stripping procedures. *Sci. Rep.* 7, 44576.
34. Sylvio Schubert, Jan Meiss, Lars Muller-Meskamp, Karl Leo. 2013. Improvement of transparent metal top electrodes for organic solar cells by introducing a high surface energy seed layer. *Adv. Energy Mater.* 3, 438.443.
35. Guoqing Zhao, Wei Wang, Tae-Sung Bae, et al. 2015. Stable ultrathin partially oxidized copper film electrode for highly efficient flexible solar cells. *Nat. Commun.* 6, 8830.
36. Yan-Gang Bi, Jing Feng, Jin-Hai Ji, et al. 2016. Ultrathin and ultrasmooth Au films as transparent electrodes in ITO-free organic light-emitting devices. *Nanoscale* 8, 10010.10015.
37. Lim, J.W., Shin, M., Lee, D.J., et al., 2014. Highly transparent amorphous silicon solar cells fabricated using thin absorber and high-bandgap-energy n/i-interface layers. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* 128, 301-306.
38. Norbert Kaiser. 2002. Review of the fundamentals of thin-film growth. *Appl Opt.* 41(16):3053-60.