ISSN 1225-8024(Print)
ISSN 2288-8403(Online)

한국표면공학회지
J. Korean Inst. Surf. Eng.
Vol. 51, No. 3, 2018.
https://doi.org/10.5695/JKISE.2018.51.3.185

<연구논문>

실리콘 웨이퍼 비저항에 따른 Dopant-Free Silicon Heterojunction 태양전지 특성 연구

김성해[a], 이정호[a,*]

[a]재료화학공학과, 한양대학교 ERICA캠퍼스, 안산, 15588

The Influence of the Wafer Resistivity for Dopant-Free Silicon Heterojunction Solar Cell

Sung Hae Kim[a] and Jung-Ho Lee[a,*]

[a]Department of Materials and Chemical Engineering, Hanyang University, Ansan, Gyeonggi-Do, 15588, Korea

(Received 26 Apil, 2018 ; revised 4 June, 2018 ; accepted 9 June, 2018)

Abstract

Dopant-free silicon heterojunction solar cells using Transition Metal Oxide(TMO) such as Molybdenum Oxide(MoO_X) and Vanadium Oxide(V_2O_X) have been focused on to increase the work function of TMO in order to maximize the work function difference between TMO and n-Si for a high-efficiency solar cell. One another way to increase the work function difference is to control the silicon wafer resistivity. In this paper, dopant-free silicon heterojunction solar cells were fabricated using the wafer with the various resistivity and analyzed to understand the effect of n-Si work function. As a result, it is shown that the high passivation and junction quality when V_2O_X deposited on the wafer with low work function compared to the high work function wafer, inducing the increase of higher collection probability, especially at long wavelength region. the solar cell efficiency of 15.28% was measured in low work function wafer, which is 34% higher value than the high work function solar cells

keywords : dopant-free silicon heterojunction solar cell, wafer resistivity, inversion layer, solar cell characterization, work function

1. 서 론

태양 전지는 태양광을 활용하여 전력을 생산하는 Photovoltaic(PV) 소자로써, 결정질 실리콘 태양전지를 중심으로 지속적인 연구, 개발이 활발히 이루어지고 있다. 하지만 결정질 태양전지는 높은 전력 생산 비용이 가장 큰 한계점으로, 태양전지 제작을 위한 도핑, 반사방지막 증착 및 firing 등 필수 공정들이 높은 온도를 수반하기 때문이다. 따라서 높은 전력 생산 비용을 극복하기 위한 태양전지의 '저가화' 및 '고효율화'를 중심으로 연구가 진행되고 있다.

그 중 열 공정을 사용하지 않고 상온 증착 기술을 활용한 태양전지가 주목을 받고 있는데, 이는 selective carrier contact layer를 활용한 dopant-free silicon heterojunction 태양전지이다[1]. Hole-selective contact으로 일함수가 매우 큰 Transition Metal Oxide(TMO)인 Molybdenum Oxide(MoO_X), Vanadium Oxide (V_2O_X), 그리고 Tungsten Oxide(WoO_X) 등을 증착하고, electron-selective contact으로 일함수가 매우 작은 Lithium Fluoride(LiF) 와 Magnesium Oxide(MgO) 등을 증착하여 기존 도핑공정을 이용한 태양전지의 이미터와 Back-Surface-Field(BSF)를 대체한다[2-5].

TMO는 전형적인 결정질 태양전지의 도핑 층인

*Corresponding Author: Jung-Ho Lee
Department of Materials and Chemical Engineering, Hanyang University
Tel: +82-31-400-5278 ; Fax: +82-31-419-7203
E-mail: jungho@hanyang.ac.kr

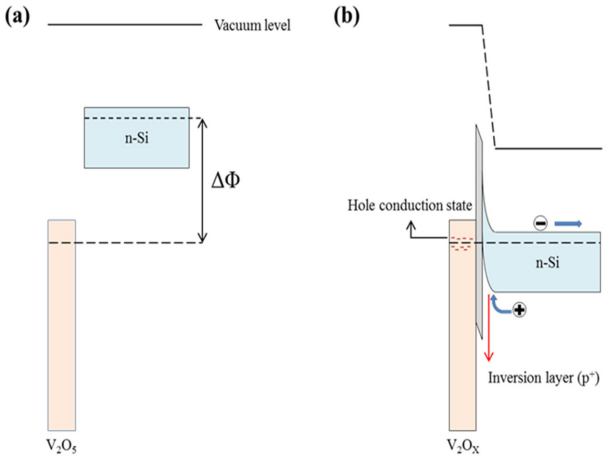


Fig. 1. The energy band changes (a) before contact, (b) after deposition V_2O_5 on n-Si. An electron transfer due to very large work function difference between V_2O_5 and n-Si induces inversion layer forming. In addition, there are oxygen deficiencies process which changes V_2O_5 into V_2O_X during thermal evaporation, forming hole conduction state.

이미터를 대체하는 후보로써, n-Si과 매우 큰 일함수 차이로 인해 증착 시 n-Si의 electron deficiency(전자 결핍)를 야기하여 inversion layer를 형성한다. 또한 진공 증착 시 발생하는 미량의 산소 결핍에 의해 hole conduction state를 제공하여 마치 이미터 층과 같은 역할을 하게 된다[6]. 이에 대한 간략한 메커니즘을 그림 1에 도시하였다.

위와 같이 TMO의 높은 일함수는 dopant-free silicon heterojunction 태양전지의 효율을 결정하는 가장 중요한 요소로, 최근 Oxygen plasma treatment 혹은 Vacuum annealing 등 추가적인 공정을 통해 TMO의 일함수를 증가시켜 n-Si와의 차이를 극대화하고 inversion layer의 품질을 개선하는 여러 연구가 진행되었다[7-8]. 하지만 일함수 차이를 극대화하는 관점에서 TMO의 일함수를 증가시키는 연구가 주로 집중되어 왔으며, 실리콘 웨이퍼 일함수를 감소시켜 태양전지의 효율을 개선하는 선행적 연구는 부족한 상황이다. 낮은 비저항을 갖는 n-Si 일수록 낮은 일함수 값을 갖기 때문에 차이를 극대화하여 태양전지 효율을 개선 할 수 있다.

본 연구에서는 다양한 비저항을 갖는 n-Si을 활용하여 dopant-free silicon heterojunction 태양전지를 제작하고, 이에 따른 효율 분석을 실시하였다.

2. 실험 방법

2.1 태양전지 제작

비저항에 따른 효율 변화를 측정 및 분석하기 위해 1-5 ohm·cm, 1-2 ohm·cm, 0.3-0.5 ohm·cm의 비저항을 갖는 525 um 두께의 웨이퍼를 선정하였다. 태양전지 제작에 앞서 모든 웨이퍼들은 10분간 5 M의 HF 용액을 통해 native oxide를 제거하였다. 이후 3:1 의 부피 비를 갖는 H_2SO_4, H_2O_2 piranha 용액에 15분간 담가 웨이퍼 표면에 존재하는 오염물을 제거하였고, 이후 다시 5 M의 HF 용액을 통해 Cleaning을 진행하였다. 본 실험에서는 V_2O_5(LTS chemical, 99.99%)를 Hole-selective contact으로 선정하였고, Thermal evaporation을 이용하여 15 nm의 두께를 증착 하였다. V_2O_5는 Mo boat에 로딩 되었으며, 8.0×10^{-6}torr 이하에서 증착이 진행되었다. 이후 60 nm의 Indium-Tin oxide (10% SnO_2, 90% In_2O_3, 99.99%)를 sputtering으로 증착 하였으며, 이후 전면 부 은 전극 또한 Thermal evaporation을 이용하여 1000 nm 두께로 증착 되었다. Electron-selective contact으로 Lithium fluoride(LTS chemical, 99.98%)를 Thermal evaporation으로 1 nm 증착 한 후, 진공을 풀지 않고 연속적으로 알루미늄 전극을 100 nm 증착 하였다. 이에 대한 공정도를 그림 2에 도시하였다.

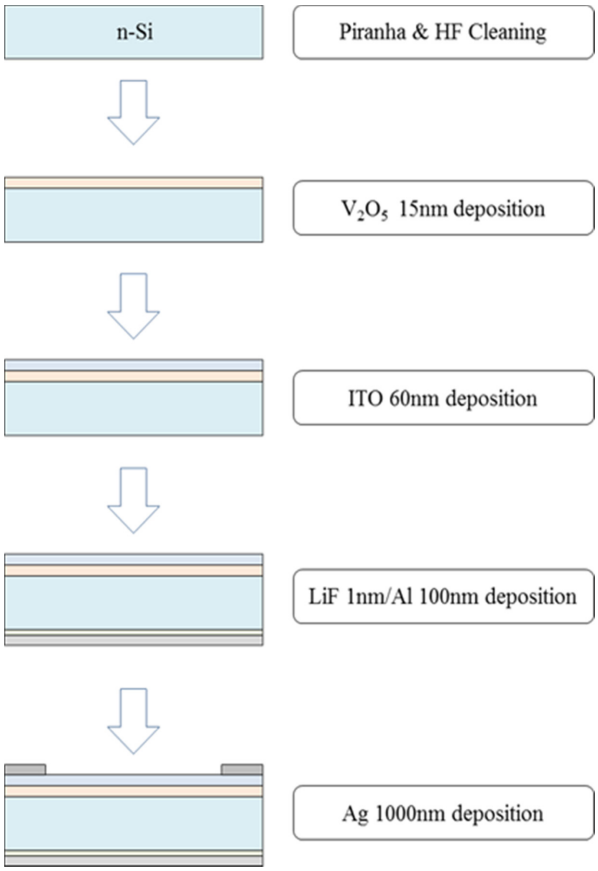


Fig. 2. The fabrication process for the dopant-free silicon heterojunction solar cell.

Table 1. Wafer characteristics depending on the wafer resistivity.

Resistivity (W·cm)	Dopant concentration (cm^{-3})	E_F (eV)	$E_{F_n} - E_{F_p}$ (eV)	Work function (eV)
4.47	1.0×10^{15}	0.2978	0.6131	4.452
1.90	2.5×10^{15}	0.3211	0.6270	4.429
0.37	1.5×10^{16}	0.3659	0.6634	4.3841

2.2 특성 평가

4-Point probe system(CTM-SR1000N, Advanced Instrument Technology)을 사용하여 각 웨이퍼 비저항을 측정하였다. 웨이퍼 도핑농도에 따른 접합 특성을 파악하기 위해 Suns-V_{OC}(Sinton)를 이용하여 Implied V_{OC}(*i*-V_{OC}), J_{01}, 및 J_{02}를 측정하였다. 양자효율은 Incident photon to current conversion efficiency (IPCE, PV measurement) 장비에서 150 W Xe arc lamp를 광원으로 400-1100 nm 파장 대 범위에서 측정하였다. 태양전지에 대한 광학적 특성은 UV-Vis/NIR spectrophotometer(Lambda 750, Perkin Elmer)를 이용하여 400-1100 nm 의 범위에서 분석되었다. 태양전지의 I-V 특성은 Solar simulator(XES-502S, SAN-EL ELECTRIC)을 이용하여 1-Sun light intensity (100mW/cm^2)에서 측정하였다.

결과 및 토의

3.1 다양한 비저항의 웨이퍼 특성

1-5 ohm·cm, 1-2 ohm·cm, 0.3-0.5 ohm·cm의 비저항을 갖는 웨이퍼들의 정확한 비저항을 측정하여 각기 4.47 ohm·cm, 1.90 ohm·cm, 0.37 ohm·cm의 비저항을 확인하였다. 비저항 측정은 5번 반복되어 평균값을 산출하였다. 각 비저항 값에 따라 도핑 농도, 페르미 준위 (E_F), 1-Sun($1 \times 10^{15} cm^{-3}$)에서의 준 페르미 준위 (E_{Fn}-E_{Fp}) 및 일함수를 계산하였다. E_F는 식 (1)에 의해, E_{Fn}-E_{Fp}는 식 (2)에 의해 계산되었다. 식 (1)과 (2)로 계산 된 E_F, E_{Fn}-E_{Fp} 및 일함수의 값은 각 4.47 ohm·cm 웨이퍼에서 0.2978 eV, 0.6131 eV, 4.452eV, 1.90ohm·cm 웨이퍼에서 0.3211eV, 0.6270eV, 4.429eV, 그리고 0.37ohm·cm 웨이퍼에서 0.3659eV, 0.6634eV, 4.3841eV 이며 이에 대한 결과를 표 1에 도시하였다. 측정 결과에서 비저항이 감소할수록 E_F, E_{Fn}-E_{Fp}가 증가하고 일함수가 감소하며, 각 측정된 값의 차이가 최대 0.0681eV, 0.0503eV, 0.0679eV임을 확인하였다. 계산 된 값들은 웨이퍼 비저항에 따라 기본 특성이 변화하며, 특히 페르미 준위 증가에 따라 일함수가 감소하는 경향성을 명백하게 보여준다. 결론적으로 dopant-free silicon heterojunction 태양전지 제작 시 낮은 비저항의 웨이퍼가 적합함을 알 수 있다.

$$E_F - E_{Fi} = kTln\left(\frac{n_0}{n_i}\right) \quad (1)$$

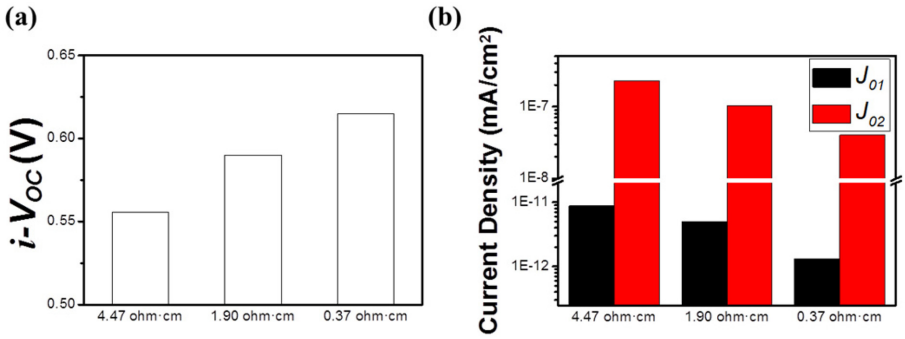
$$E_{Fn} - E_{Fp} = kT\left[\ln\left(\frac{n_0+\delta n}{n_i}\right) + \ln\left(\frac{p_0+\delta p}{n_i}\right)\right] \quad (2)$$

E_F : Fermi level at equilibrium
E_{Fi} : Intrinsic fermi level
E_{Fn} : Electron quasi-fermi level
E_{Fp} : Hole quasi-fermi level
δn : Excess electron concentration
δp : Excess hole concentration
n_0 : Electron concentration at equilibrium
p_0 : Hole concentration at equilibrium
n_i : Intrinsic carrier concentration

3.2 V_2O_X와 n-Si의 접합 특성

웨이퍼 비저항에 따른 V_2O_X와의 접합 특성을 판단하기 위해 Implied-V_{OC} (*i*-V_{OC}), J_{01} 및 J_{02} 를 측정하였으며, 그 측정 결과를 그림 3에 도시하였다. 그림 3(a)는 *i*-V_{OC}의 측정 결과이며, 4.47 ohm·cm, 1.90 ohm·cm, 0.37 ohm·cm 의 비저항을 갖는 웨이퍼에서 각기 0.5556 eV, 0.5901 eV, 0.6151 eV의 값이 측정되었다. *i*-V_{OC}는 캐리어 유효수명에 의존하는 지표이기 때문에 실리콘 내부에서 여기 된 캐리어가 V_2O_X가 증착 된 낮은 비저항 웨이퍼 표면에서 재결합 되지 않고 더욱 오래 여기 상태에 있음을 나타낸다. 일함수 차이가 클수록 V_2O_X 증착 시 더 많은 전자가 TMO로 이동하여 표면의 전자 결핍을 야기하기 때문에 낮은 비저항 웨이퍼 표면이 V_2O_X와 접합 시 더 높은 패시베이션 특성을 갖는다고 할 수 있다.

접합 특성을 더욱 구체적으로 분석하기 위해 태양전지의 다이오드 특성을 J_{01}와 J_{02}로 구분하여 추가적인 분석을 실시하였다. J_{01}와 J_{02}는 다이오드 포화전류로 태양전지에서 전자-정공쌍의 재결합 정도와 어떠한 방식으로 재결합 되었는지 확인하는 지표이므로, 포화전류를 측정하여 V_2O_X가 웨이퍼와 증착되었을 때 형성되는 Inversion layer의 품질과 웨이퍼 표면 특성을 파악하고, 추가적으로 비저항에 따른 경향성 또한 분석하였다[9-10].



(c)

Samples	i-V_{OC} (V)	J_{01} (mA/cm²)	J_{02} (mA/cm²)
4.47 ohm·cm	0.5556	8.73×10^{-12}	2.3×10^{-7}
1.90 ohm·cm	0.5901	4.99×10^{-12}	1.02×10^{-7}
0.37 ohm·cm	0.6151	1.32×10^{-12}	4.01×10^{-8}

Fig. 3. (a) Implied-V_{OC}, (b) J_{01} and J_{02} difference according to the various wafer resistivity, and (c) summary of the measured data.

그림 3(b)에서 J_{01}은 비저항의 감소에 따라 순차적으로 8.73×10^{-12}, 4.99×10^{-12}, 1.32×10^{-12}mA/cm^{2}으로, J_{02}는 2.3×10^{-7}, 1.02×10^{-7}, 4.01×10^{-8}mA/cm^{2}으로 감소하는 것을 확인하였다. J_{01}는 표면 및 벌크 영역에서 소수 캐리어의 유효수명을 나타내는 지표이며 실리콘 웨이퍼에서는 유효수명이 표면 패시베이션 품질에 크게 의존하므로 V_2O_X 증착 시 표면 패시베이션의 정도를 나타낸다고 할 수 있다. 따라서 위의 i-V_{OC}의 경향성과 마찬가지로 낮은 비저항 웨이퍼에서 높은 표면 패시베이션 특성을 가짐을 알 수 있다. J_{02}는 접합 공핍층(Depletion layer)에서 국소 열에 의해 재결합 되는 정도를 나타낸다. 이 포화전류는 공핍층 폭에 의존하므로 접합 품질을 파악할 수 있다. 그림 3(b)에서 J_{02} 또한 비저항의 감소에 따라 값이 감소하였으며, 낮은 비저항의 웨이퍼에 V_2O_X가 증착되었을 때 생성되는 Inversion layer가 더욱 이상적인 접합으로 형성됨을 나타낸다. 결론적으로 낮은 비저항의 웨이퍼가 V_2O_X와 증착 시 더 높은 표면 패시베이션 및 접합 품질을 가지며, 이는 일함수의 차이가 극대화되어 발생한 결과로 판단된다. 이에 대한 종합적인 측정 결과를 그림 3(c)에 요약하였다.

J_{01}와 J_{02}가 태양전지에 미치는 영향을 분석하기 위해 double-diode model을 설정하였다. 태양전지는 식(3)과 같이 J_{01}와 J_{02}에 대응하는 각기 다른 다이오드 항을 가지며, 각 지수함수 내의 이상계수가 다르다는 것을 알 수 있다. J_{01}을 포함하는 지수함수의 이상계수는 1이며, J_{02}을 포함하는 지수함수의 이상계수는 2이다. 이상계수는 다이오드에 대한 전압 함수로, 태양전지에서는 1에 가까울수록 이상적인 다이오드 거동을 보인다. J_{02}가 큰 경우, 태양전지의 이상계수가 1보다 커지며, 커지면 커질수록 2에 접근하게 된다. 포화전류 J_{01}의 증가는 태양전지의 개방전압(V_{OC})의 감소를 야기하지만, J_{02}는 일반적인 태양전지의 경우 개방전압에 영향을 줄만큼 크지 않으므로 충진율(FF)을 떨어뜨리게 된다. 따라서 위에서 측정한 J_{01}과 J_{02}의 결과는 낮은 비저항을 갖는 웨이퍼에서 높은 패시베이션 특성 및 접합 품질을 가져 높은 V_{OC}, FF 및 단락전류(J_{SC})를 보여줄 수 있다고 해석 할 수 있다.

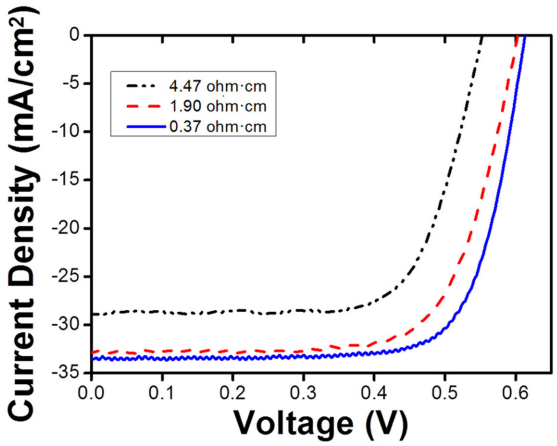
$$J = J_L - J_{01}\exp\left\{\frac{q(V+JR_S)}{kT}-1\right\} - J_{02}\exp\left\{\frac{q(V+JR_S)}{2kT}-1\right\} - \frac{(V+JR_S)}{R_{Shunt}} \quad (3)$$

J_L : *Photo current density*
R_s : *Series resistance*
R_{shunt} : *Shunt resistance*
J_{01} : *Surface recombination current density*
J_{02} : *Junction recombination current density*
q : *the elementary charge*
k : *Boltzmann constant*

3.3 Dopant-free silicon heterojunction 태양전지 효율 분석

그림 4는 다양한 비저항을 갖는 웨이퍼들로 제작

한 태양전지의 J-V 효율을 보여준다. 비저항에 따른 태양전지 효율 변화는 11.42, 13.98, 15.28 %로 최대 3.86 %의 효율 차이를 보였다. J_{SC}는 비저항의 감소에 따라 28.98, 32.75, 33.39 mA/cm^{2}으로 증가하여 최대 4.41 mA/cm^{2}의 변화를 확인하였다. V_{OC}는 0.552, 0.602, 0.613V로 최대 61 mV 증가하였다. 마지막으로 FF는 71.42, 70.91, 74.68% 로 최대 3.26%가 증가하였다. 위에서 언급하였던 대로 낮은 비저항의 웨이퍼에서 V_2O_X 증착 시 더욱 높은 표면 패시베이션 특성을 가지므로 재결합이 감소하여 높은 J_{SC}와 V_{OC} 값을 가지며, 또한 비저항이 낮은 웨이퍼에서 더욱 높은 접합 품질을 가지므로 접합 재결합 감소로 인한 높은 FF 값을 가진다. FF 변화를 더욱 구체적으로 분석하기 위해 다른 비저항으로 제작 된 태양전지의 병렬저항(R_{shunt}) 및 직렬저항(R_{series}) 측정을 실시하였다. 웨이퍼 비저항 감소에 따라 병렬저항은 각기 2.014, 2.921, 3.090 kΩ·cm^2, 직렬저항은 각기 2.11, 2.29, 1.63 Ω·cm^2 로 측정되었다. R_{shunt}의 경우 비저항 감소에 따라 증가하지만 모든 태양전지에서 높은 값을 가지므로 FF 변화에 큰 영향을 미치지 않았다. R_{series}의 경우 비저항이 작은 웨이퍼에서 가장 작은 값이 측정되었지만, 기존의 경향성과 달리 1.90 ohm·cm의 비저항을 갖는 웨이퍼에서 가장 높은 R_{series}값이 측정되었다. 다만 차이가 매우 작기 때문에 이는 공정 변수에 의한 오차로 판단된다.



Sample	J_{SC} (mA/cm^2)	V_{OC} (V)	FF (%)	Efficiency (%)	R_{shunt} (kΩ·cm^2)	R_{series} (Ω·cm^2)
4.47 ohm·cm	28.98	0.552	71.42	11.42	2.014	2.11
1.90 ohm·cm	32.75	0.602	70.91	13.98	2.921	2.29
0.37 ohm·cm	33.39	0.613	74.68	15.28	3.090	1.63

Fig. 4. Light J-V behavior under one sun conditions of the dopant-free silicon heterojunction solar cells with different wafer resistivity.

비저항에 따른 효율 변화에 대한 광학적, 전기적 특성을 복합적으로 판단하기 위해 태양전지의 반사도와 양자 효율(EQE, External Quantum Efficiency)을 측정하였다. 그림 5(a)에서 각기 다른 비저항으로 제작된 태양전지의 반사도가 전 파장대에서 일정하였으며, 태양전지의 광 흡수도가 비저항에 의해 크게 변화하지 않는다는 것을 확인하였다. 제작된 태양전지들의 광 반사도가 모두 똑같기 때문에 양자효율을 측정함으로써 각 파장에 대한 수집 확률을 파악하였다. 그림 5(b)에서 양자효율은 비저항이 감소할수록 전 파장에서 더 높은 값을 가지며, 특히 600nm 이상의 파장에서 큰 차이를 확인하였다. 빛의 파장이 길어질수록 빛의 흡수 계수가 낮아져 접합부와 떨어진 bulk에서 전자-정공쌍으로 여기하게 되어 수집 확률이 떨어지게 되는데, 이 수집 확률 또한 표면 패시베이션 품질에 강하게 의존한다. 따라서 V_2O_X 증착에 따른 전면부 패시베이션 품질에 장파장대 흡수 확률이 결정된다고 할 수

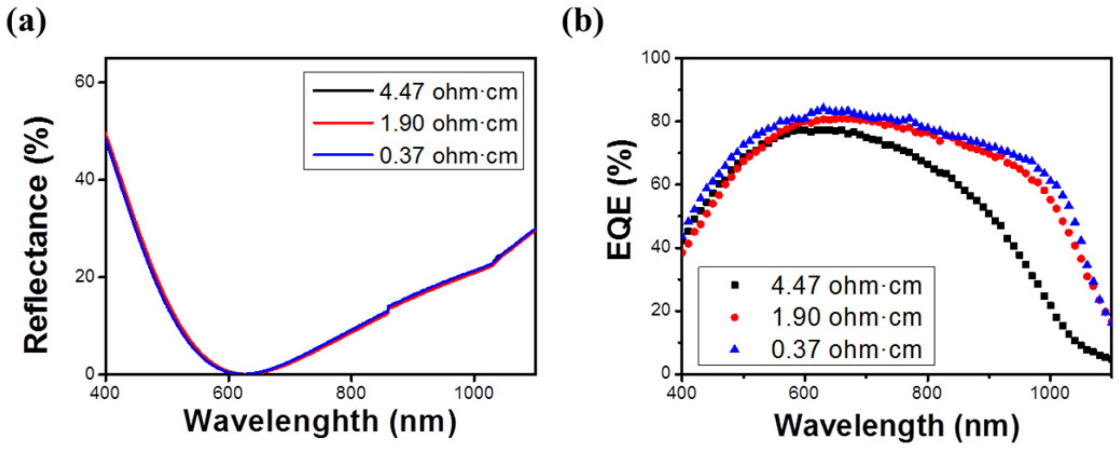


Fig. 5. (a) Reflectance spectra and (b) External Quantum Efficiency (EQE) depending on the wafer resistivity.

있다. 따라서 낮은 비저항 웨이퍼의 높은 전면부 패시베이션 품질로 인해 장파장대 수집 확률이 증가하였으며, 이에 따라 J_{SC} 또한 증가함을 확인하였다.

결 과

본 논문에서는 다양한 비저항을 갖는 웨이퍼에 대한 기본 특성을 파악하였고, 태양전지를 제작하여 비저항에 따른 효율 변화를 광학적, 전기적으로 분석하였다. 비저항에 따른 도핑농도를 계산하여 페르미 준위, 준 페르미 준위 및 일함수를 계산하고 이에 대한 경향성을 파악하여 낮은 비저항을 갖는 웨이퍼에서 더욱 높은 태양전지 효율을 가질 수 있음을 간접적으로 확인하였다. 또한 $i\text{-}V_{OC}$, J_{01} 및 J_{02}를 측정하여 낮은 비저항 웨이퍼에서 V_2O_X 증착 시 더욱 높은 표면 패시베이션 및 접합 특성을 확인하였으며, 이러한 특성 변화는 EQE 측정 결과에서 빛에 의해 여기 된 전자-정공쌍의 수집률 증가를 야기하였다. 태양전지 제작 시 0.37 ohm·cm의 비저항을 갖는 웨이퍼에서 J_{SC} 33.39 mA/cm^2, V_{OC}는 0.612V, FF는 74.68%, 효율 15.28%로 가장 높은 효율을 기록하였고, 이는 4.47 ohm·cm의 비저항을 갖는 웨이퍼로 제작 된 태양전지 대비 약 34% 더 높은 효율임을 확인하였다. 이 중 V_{OC}의 경우 고효율의 태양전지를 제작하기 위해 필수인 패시베이션 공정을 일체 사용하지 않고 웨이퍼의 비저항 조절만으로 0.6 V 이상의 결과는 고무적이라고 할 수 있다. 현재 가장 일반적으로 진행되는 후면 패시베이션 공정을 적용한다면 V_{OC}가 0.7 V에 근접하는 값을 얻을 수 있을 것으로 예상되며, 이로써 열 공정을 배제한 상온 증착 방식만으로 제작 된 Dopant-free silicon heterojunction 태양전지의 가능성을 확인하였다.

Acknowledgments

본 연구는 2015년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제(No. 20153030012190) 입니다.

References

[1] Bullock J, Efficient silicon solar cells with dopant-free asymmetric heterocontacts, Nature Energy, 2016, 1, 15031

[2] Almora O, Superior performance of V_2O_5 as hole selective contact over other transition metal oxides in silicon heterojunction solar cells, Sol. Energy Mater. Sol. Cells, 2017, 168, 221-226

[3] Mews M, Oxygen vacancies in tungsten oxide and their influence on tungsten oxide_silicon heterojunction solar cells, Sol. Energy Mater. Sol. Cells, 2016, 158, 77-83

[4] Bullock J, Lithium Fluoride Based Electron Contacts for High Efficiency n-type Crystalline Silicon Solar cells, Adv. Energy Mater, 2016, 6, 1600241

[5] Wan Y, Conductive and Stable Magnesium Oxide Electron Selective Contacts for Efficient Silicon solar cells, Adv. Energy Mater, 2017, 7, 1601863

[6] L.G. Gerling, Origin of passivation in holeselective transition metal oxides for crystalline silicon heterojunction solar cells, J. Mater. Res, 2017, 32, 260-268

[7] Liu X, Effect of oxygten plasma treatment on air exposed MoOx thin film, Org, Electron, 2014, 15, 977-983

[8] Irfan I, Work function recovery of air exposed molybdenum oxide thin films, Appl. Phys. Lett, 2012, 101, 093305

[9] L.G. Gerling, S. Mahato, A. Morales-Vilches, G. Masmitja,P. Ortega, C. Voz, R. Alcubilla, and J. Puigdollers, Transition metal oxides as hole-selective contacts in silicon heterojunctions solar cells. Sol. Energy Mater. Sol. Cells, 2016, 145, 109-115.

[10] Wu, W, Dopant free multilayer back contact silicon solar cells employing V2Ox_Metal_V2Ox as an emitter, RSC Adv, 2017, 7, 23851-23858