

# Na 도핑된 ZnTe 후면전극을 이용한 CdTe 태양전지의 안정성 개선에 관한 연구

차은석 · 박규찬 · 안병태\*

한국과학기술원 신소재공학과, 대전시 유성구 대학로 291, 305-338

## Stability Improvement of CdTe Solar Cells using ZnTe:Na Back Contact

Eun Seok Cha · Kyu Cham Park · Byung Tae Ahn\*

Department of Materials Science and Engineering, KAIST, Daehak-ro 291, Yuseong-goo, Daejeon 305-338, Korea

**ABSTRACT:** Cu doping by copper or  $\text{Cu}_2\text{Te}$  materials enhances p+ formation in CdTe near the back contact interface, allowing better formation of ohmic contact. However, the Cu in CdTe junction is also considered as a principal component of CdTe cell degradation. In this paper, Na-doped ZnTe layer was employed as a back contact material to improve the stability of CdTe solar cells. As a process variable, post  $\text{CdCl}_2$  treatment of CdS/CdTe film was conducted before or after depositing ZnTe:Na on CdTe. The change of the photovoltaic properties of CdTe cells were investigated with aging time. Low-temperature photoluminescence analysis was conducted to describe the degradation mechanism. The result showed that the CdTe solar cells with better stability compare to Cu contact were achieved using an optimized ZnTe:Na back contact.

**Key words:** CdTe solar cells, Back contact, Na-doped ZnTe, Na doping, stability

### Nomenclature

$J_{sc}$  : short-circuit current density,  $\text{mA}/\text{cm}^2$

$V_{oc}$  : open-circuit voltage, V

FF : fill factor

CSS : close space sublimation

CBD : chemical bath deposition

### 1. 서론

현재 태양전지의 개발목표는 저가, 고효율의 태양전지 제조를 통하여 기존 전력과의 가격 경쟁력을 가지는 것이다. CdTe 박막태양전지는 낮은 제조가격과 높은 증착속도, 다양한 제조 공정 등의 장점을 가지고 있어 박막 태양전지에 이상적인 물질로 간주되고 있다. 높은 흡수계수와 1.5eV의 직접천이형 에너지 gap은 태양전지의 스펙트럼을 고려했을 때 에너지 변환에 매우

적합한 특성이다<sup>1)</sup>.

1980년대 후반부터 전 세계적으로 많은 연구그룹과 회사에서 CdTe 태양전지를 연구해 왔으며 소면적, 대면적에서 태양전지의 효율 증가를 기록하였다<sup>2-5)</sup>. CdTe 태양전지의 고효율에 핵심적인 역할을 한 것은 CSS (Close space sublimation) 방식을 이용하여 광흡수층인 CdTe를 증착하는 것과 광투과층인 CdS의 두께 감소 등을 언급할 수 있다. CSS 방식으로 증착된 CdTe 막은 결정성과 전하의 이동도가 우수하고 빠른 증착 속도로 인해 두께의 조절이 용이한 장점을 가지고 있다<sup>6)</sup>.

이렇게 광흡수층과 광투과층의 특성개선을 통해 초기 효율은 증가하였지만 저항이 낮고 안정성이 있는 후면전극을 형성하는 것은 여전히 CdTe 태양전지에서 가장 중요하게 해결해야 할 과제로 남아있다. CdTe는 일함수가 매우 크고 self-compensation 특성으로 도핑이 매우 어렵기 때문에 ohmic 접합을 형성하기가 매우 어렵다. 현재 일반적으로 후면전극은 Cu를 표면에 증착하여 p+ 도핑을 통해 ohmic 접합을 형성하는 방법을 가장 많이 사용하고 있다<sup>7-9)</sup>. 하지만 Cu를 사용한 경우 Cu의 확산에 의해서 태양전지의 효율이 열화되는 현상이 일어나는 것으로 관찰되어 안정성이 떨어지는 것으로 보고되고 있다<sup>9-11)</sup>.

본 연구에서는 CdTe 태양전지구조에서 저항이 낮으면서도

\*Corresponding author: btahn@kaist.ac.kr

Received February 22, 2015; Revised February 28, 2015;

Accepted March 3, 2015

안정한 전극을 형성하기 위해 ZnTe:Na 전극을 제안하였다<sup>12)</sup>. 안정성을 저해하는 요소인 Cu를 제거하고 이를 대체할 수 있는 물질로 Na를 사용하였다. Na는 CIGS/CdS 태양전지에서 dopant로 사용되었지만 이로 인한 효율의 안정성 감소 등은 보고된 적이 없기 때문에 CdTe 태양전지에서 충분한 역할을 할 것으로 기대하였다. 다만 Na는 Cu와 마찬가지로 CdTe의 compensation 특성으로 인해 직접 도핑이 힘들기 때문에 후면전극인 ZnTe를 제안하여 Na dopant로 사용하여 CdTe와 ZnTe:Na 간의 contact을 형성하고자 하였다. ZnTe:Na 후면전극을 적용하는 방식에 따라 태양전지의 특성을 분석하고 열화되는 특성의 원인을 살펴보았다. 또한 ZnTe:Na 후면전극의 최적화를 통해 안정성이 있는 CdTe 태양전지를 제조하였고 이에 대한 특성을 분석하였다.

## 2. 실험 방법

본 연구에서는 borosilicate 계열의 Corning Pyrex 7740 유리 위에 ITO를 260 nm 증착하여 기판으로 사용하였다. 기판 위에 다음의 CBD 방법을 사용하여 CdS 박막을 180nm 두께로 증착하였다. CBD 반응용기에 0.01M의 Cd(CH<sub>3</sub>COO)<sub>2</sub> 수용액과 0.02M(NH<sub>2</sub>)<sub>2</sub>CS 수용액을 넣고 75°C로 온도를 유지하였다. 암모니아수를 추가적으로 넣어 용액의 pH를 12로 조절하였다. 광흡수층으로 사용된 CdTe 막은 근접증발법(Close space sublimation, CSS)을 이용하여 제조하였다.

CSS법을 이용하기 위해서는 소스가 필요하게 되는데, 본 연구에서는 소스 제조시 Cd와 Te 분말을 점성이 있는 propylene glycol 용액과 혼합한 후 500°C에서 소결하여 소스를 제조하였다. 소결 전 Cd/Te의 비는 소결 후 1:1로 근접하게 되는데 소결 전 Cd의 비율이 높을수록 증착은 용이하지만 증착 후 비저항이 높고 전하농도가 감소한다<sup>13)</sup>. 본 연구에서는 Cd/Te를 0.67의 비로 제조하였다. 소스온도는 650°C, 기판온도는 575°C, 증착시간은 3분으로 하여 박막의 두께는 5 μm로 고정하였다.

만들어진 CdTe/CdS 소자는 두 가지 방법을 이용하여 태양전지로 완성되었는데 첫 번째는 ZnTe:Na 후면전극을 먼저 증착한 이후에 CdCl<sub>2</sub> 열처리를 하여 태양전지를 완성시키는 방법이고 두 번째 방법은 CdCl<sub>2</sub> 열처리를 먼저 하고 이후에 ZnTe:Na 후면전극을 증착하는 방식이다. CdCl<sub>2</sub> 열처리는 CdTe/CdS 소자를 CdTe의 면이 하부를 향하게 위치시키고 하부에는 CdCl<sub>2</sub> powder를 깔아 380°C에서 30분간 열처리하였다. ZnTe:Na 후면전극은 진공증발법을 사용하여 100 nm 두께로 증착하였고 사용한 소스는 Na<sub>2</sub>Te를 5wt% 혼합한 ZnTe 분말을 사용하였다. 이후 Mo를 스퍼터링하여 100 nm 두께의 금속전극을 증착하여 태양전지를 완성하였다.

태양전지 특성은 AM1.5 스펙트럼 100 mW/cm<sup>2</sup> 세기에서 측

정하였고 일정한 시간간격으로 광특성을 측정하여 태양전지의 안정성을 관찰하였다. 박막내의 결함을 분석하기 위하여 저온 Photoluminescence (PL)을 이용하였다.

## 3. 결과 및 토의

본 장에서는 Mo/ZnTe:Na 후면전극을 적용하는 방법으로 CdTe 광흡수층에 ZnTe:Na 전극을 먼저 증착하고 이후 CdCl<sub>2</sub> 열처리를 실행하는 방식과 CdTe 광흡수층에 CdCl<sub>2</sub> 열처리를 먼저 실행하고 이후 ZnTe:Na 후면전극을 증착하는 두 가지 구조의 태양전지를 제작하고 광전압 특성과 안정성을 관찰하였다.

먼저 언급된 ZnTe:Na 증착이후 CdCl<sub>2</sub> 열처리를 한 태양전지는 크게 두 가지의 특성을 가지게 설계되었다. 첫 번째는 일반적으로 기판이 상온인 상태에서 진공증발법으로 증착한 물질은 비정질 상으로 존재하는 경우가 많은데 이렇게 결정성이 약한 상으로 존재하는 ZnTe:Na 후면전극을 CdCl<sub>2</sub> 열처리를 통하여 다결정 상으로 만들어주어 전기적인 특성을 향상시키고자 하는 목적이고, 두 번째는 ZnTe:Na와 CdTe 계면에서 생성된 defect를 줄여 후면 전극 부분에서 일어나는 재결합을 줄이고자 하였다. 이와 같은 구조를 사용했을 때 문제점도 작용할 수 있는데, CdCl<sub>2</sub> 열처리 중 과도한 처리를 가하게 되면 ZnTe와 CdTe의 intermixing이 심해져 ZnTe 후면전극이 구조적으로 손실되는

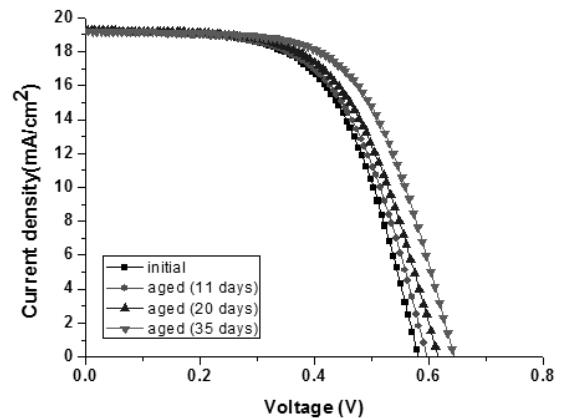


Fig. 1. Illuminated curve with various aging time using CdCl<sub>2</sub>/ZnTe:Na/CdTe structure

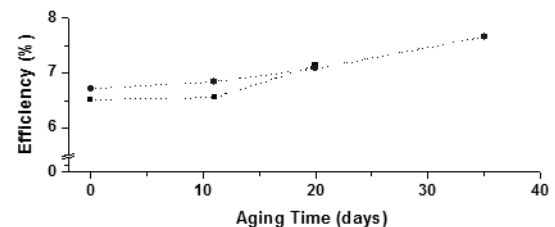


Fig. 2. Efficiency variation with various aging time using CdCl<sub>2</sub>/ZnTe:Na/CdTe structure

결과를 가져올 수도 있다. 또한 CdCl<sub>2</sub> 의 Cl 원자가 ZnTe의 Te site에 위치하게 되어 n-type dopant 역할을 하게 되면 ZnTe가 compensation 되어 p type 특성이 약해져 전기적 특성이 저하되고 태양전지의 효율 감소를 가져올 가능성도 존재한다.

Fig. 1과 2는 CdTe 광흡수층에 ZnTe:Na 후면전극을 증착한 이후에 CdCl<sub>2</sub> 열처리를 실행하고 Mo를 증착하는 방식으로 제작된 태양전지의 초기 광전압 곡선 그래프와 이를 자연광 상태에 노출시켜 에이징 시킨 후에 측정된 광전압 곡선의 그래프이다. 초기효율 6.7%, Voc=0.58 V, Jsc=19 mA/cm<sup>2</sup>, FF=60%의 특성을 보였다. 이 구조를 사용하여 태양전지를 제조한 경우에 에이징이 진행될수록 Voc가 증가하여 효율이 증가하는 모습을 보였다. 이렇게 향상된 태양전지의 효율은 8.9%까지 증가하였고 Voc=0.7 V, Jsc=19 mA/cm<sup>2</sup>, FF=66%의 특성을 보였다.

앞선 제작한 태양전지의 구조와 다르게 CdTe 광흡수층에 CdCl<sub>2</sub> 열처리를 마치고 ZnTe:Na 후면전극을 형성하는 구조를 사용한 태양전지의 광전압 특성과 안정성을 살펴보고자 하였다. 이와 같은 구조의 태양전지는 CdCl<sub>2</sub> 열처리를 끝낸 이후 CdTe 내부와 표면의 결합을 최대한 제거한 상태에서 ZnTe:Na를 증착하고 후면전극에 열을 가하지 않기 때문에 ZnTe:Na와 CdTe의 mixing을 최소화하는 방식이다. 또한 ZnTe가 CdCl<sub>2</sub>에 노출되지 않기 때문에 Cl에 의한 compensation effect도 줄일 수 있을 것으로 예상된다.

Fig. 3과 4는 CdTe 광흡수층에 CdCl<sub>2</sub> 열처리를 마치고 이후

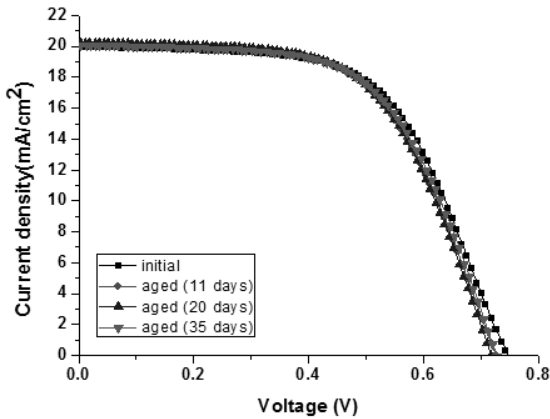


Fig. 3. Illuminated curve with various aging time using ZnTe:Na/CdCl<sub>2</sub>/CdTe structure

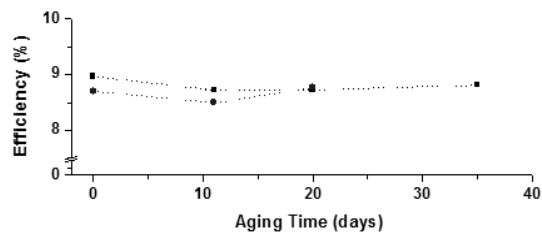


Fig. 4. Efficiency variation with various aging time using ZnTe:Na/CdCl<sub>2</sub>/CdTe structure

에 ZnTe:Na 후면전극을 형성하는 구조를 사용하여 광전압 특성과 안정성을 측정한 그래프이다. 이전 태양전지의 광전압 특성과 다른 점은 초기효율이 9%로 상대적으로 높은 효율을 보인다는 것이고, 또한 에이징이 진행되어도 효율의 변화가 없는 태양전지 특성을 보인다는 것을 관찰할 수 있다. Voc=0.75 V로 0.5~0.6 V 정도의 Voc를 보이는 이전 구조의 태양전지와 큰 차이를 보이고 있다.

이와 같은 두 가지 방식으로 후면전극을 적용하였을 때 태양전지의 광전압 특성과 안정성이 바뀌는 원인을 저온 Photoluminescence (PL)을 통하여 확인하고자 하였다.

PL분석은 633 nm의 레이저를 Mo를 입하지 않은 CdCl<sub>2</sub>/ZnTe:Na/CdTe, ZnTe:Na/CdCl<sub>2</sub>/CdTe 두 가지 구조의 태양전지에 ZnTe:Na 쪽으로 입사시켜 10K에서 측정하였다.

Fig. 5는 두 가지 구조의 태양전지의 PL 그래프를 나타내고 있다. 10K에서 CdTe의 밴드갭은 1.6eV 근처이고, 측정된 PL 그래프는 1.40eV와 1.55eV 근처의 peak이 주로 보이고 있다. 1.4eV의 peak은 conduction band에서 Cd vacancy site로의 transition에 의한 peak으로 보여진다. 특이한 점은 1.55eV 근처의 peak의 크기가 다른 것인데, 문헌상에서는 1.55eV 근처의 transition에 대해 특별히 보고한 내용이 없었다. 하지만 그래프의 붉은색과 검은색으로 표시한 두 가지 구조의 태양전지의 Voc 특성과 1.55eV 근처의 peak을 연관시켜보면 band edge 근처에서 이루어지는 transition으로 예상할 수 있는데, 0.48 V의 낮은 Voc를 보이는 붉은 그래프에서 1.55eV의 peak이 우세한 것으로 보아 donor site에 의한 peak일 것으로 생각할 수 있다. 이를 확인하기 위하여 CdCl<sub>2</sub>/ZnTe:Na/CdTe의 구조로 cell을 제작한 이후 에이징하여 Voc를 회복한 태양전지를 추가적으로 PL 측정을 해보았다. 앞서 언급한 바와 같이 Voc가 회복된 태양전지는 1.55eV의 근처에서 peak의 크기가 크게 감소한 것을 관찰하였다. 이를 통해 두 가지 구조의 태양전지에서 전극의 형성 방식의 차이로 인해 1.55eV 근처의 donor level의 defect density가

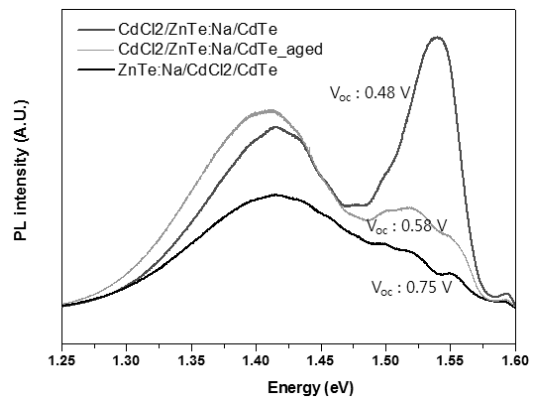


Fig. 5. PL analysis of CdTe solar cells using ZnTe:Na back contact

달라지고 이러한 영향으로 인해 태양전지의 Voc가 달라진다고 해석할 수 있다. 또한 aging과 annealing 등을 통해 1.55eV의 defect site를 줄일 수 있고 Voc가 회복되는 결과를 가져왔을 것으로 예상하고 있다.

Fig. 6은 CdTe 태양전지의 내부에 존재하는 defect의 가능성을 알아보기 위해 이를 개략적으로 나타낸 그림이다. CdTe 태양전지에서 donor site로 작용할 수 있는 것은 Cl<sub>Te</sub>와 Na<sub>i</sub> 등이 있다. Cl<sub>Te</sub>에서 V<sub>cd</sub>으로 transition 되는 process는 1.45eV 근처에서 일어난다고 문헌에서 보고 된 바 있다<sup>10)</sup>. 현재 제작한 CdTe 태양전지에서는 이종의 물질이 존재하지 않기 때문에 1.55eV의 에너지 레벨을 보이는 donor site는 Na<sub>i</sub>이 유력할 것으로 생각된다. PL의 결과에서 ZnTe:Na/CdCl<sub>2</sub>/CdTe 구조를 사용한 경우에는 자연적으로 존재하는 Cd vacancy site를 CdCl<sub>2</sub> treatment를 통해 최소화시키고 추후에 ZnTe:Na를 증착함으로써 Na이 interstitial site에 침투하는 확률을 줄여줄 것으로 해석할 수 있다. 또한 CdTe에 먼저 ZnTe:Na를 증착한 경우에는 표면에 Cd vacancy site에 상대적으로 많이 존재하고 Na<sub>i</sub>과 결합하여 donor-acceptor pair를 이루고 있을 것으로 생각된다. 이는 aging이나 annealing을 통해 Na이 Cd vacancy site로 자리를 찾아가면서 defect이 줄어들고 이를 통해 Voc가 향상되는 과정을 거치는 것으로 보인다. 하지만 이러한 경우에도 초기에 CdCl<sub>2</sub> treatment를 진행하고 ZnTe:Na를 증착했을 때에 비해 1.55eV의 peak의 크기를 줄일 수 없기 때문에 가장 안정성을 보이는 구조는 Mo/ZnTe:Na/

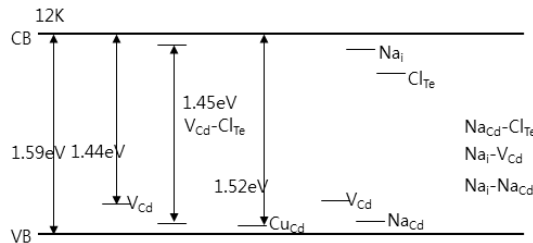


Fig. 6. Possible defect transition in CdTe using ZnTe:Na back contact

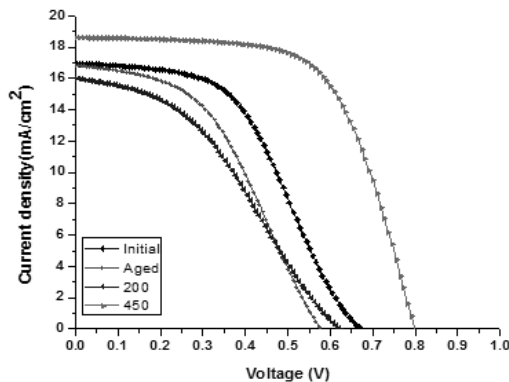


Fig. 7. Illuminated curve with various aging time and temperature using 10wt% Na<sub>2</sub>Te in ZnTe source

CdCl<sub>2</sub>/CdTe의 구조로 생각된다.

Fig. 7은 source 내의 Na<sub>2</sub>Te 함량을 두 배(10wt%)로 증가시켜 ZnTe:Na를 증착한 태양전지의 광전압 특성 곡선이다. 구조는 ZnTe:Na/CdCl<sub>2</sub>/CdTe의 구조를 사용하였고 aging이 끝난 이후에는 RTA로 annealing하여 효율 변화를 관찰하였다. 기존의 5wt%의 Na<sub>2</sub>Te powder가 포함된 ZnTe source를 사용한 경우, 같은 구조로 제작한 태양전지는 초기효율 9%의 안정적인 특성을 보였다. 하지만 본 실험에서는 초기 효율이 모두 4~6% 대의 낮은 효율을 보였다. 기존의 5wt% Na<sub>2</sub>Te 함량의 source를 사용한 경우와 마찬가지로 aging을 통해서 효율의 변화는 없으므로 관찰되었다. 하지만 후속 열처리를 한 경우에는 매우 큰 차이를 보였는데 기존의 cell 들이 300°C까지 열처리 동안에는 큰 효율의 변화가 없다가 400°C이상의 온도의 열처리를 가하면 효율이 감소하는 것에 비해 10wt%의 Na<sub>2</sub>Te powder를 사용한 경우에는 300°C까지 효율 변화가 없는 비슷한 특성을 보이다가 더 높은 온도의 열처리를 가하는 순간 cell의 특성이 급격하게 좋아지는 것을 관찰하였다(Fig. 8). 10wt% Na<sub>2</sub>Te powder source를 사용한 경우 열처리 이후 모두 9~9.5%의 높은 변환 효율을 보였다. 그리고 앞서 0.75V 정도의 최대 Voc를 보였던 것과 다르게 Voc가 0.8V까지 증가하는 모습을 관찰하였다.

이 실험을 통해 source 내의 Na 함량 변화는 진공증발법으로 증착된 박막내의 Na 함량에 영향을 줄 것으로 예상하고 이에 대한 관계 규명이 필요할 것으로 생각된다. 추후 이를 실험을 통하여 검증하고자 한다. 이 실험이 의미하는 바는 Na 함량의 변화를 통해 CdTe 태양전지의 Voc가 영향이 있는 것을 확인하였고 이는 carrier density의 변화가 우선적으로 예상되는 바, 추후에 최적화를 통해 ZnTe:Na를 사용해서 Cu free 한 CdTe 태양전지로 고효율을 달성할 수 있을 것으로 기대한다.

Fig. 9는 ZnTe:Na와 Cu<sub>2</sub>Te의 두 후면전극을 이용한 CdTe 태양전지의 초기효율과 자연광 상태에 노출되면서 일어나는 효율 변화를 측정 그래프이다. 우선적으로 태양전지를 완성한 직후 Cu<sub>2</sub>Te 후면전극을 사용한 경우는 12%의 초기효율을 보였지만

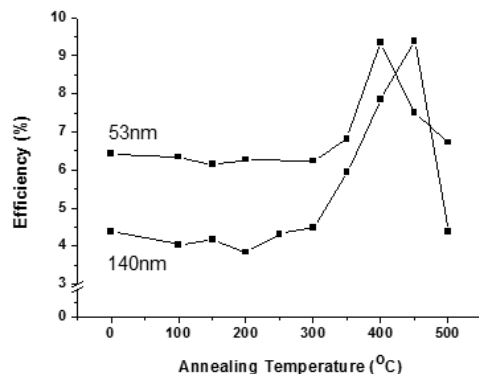
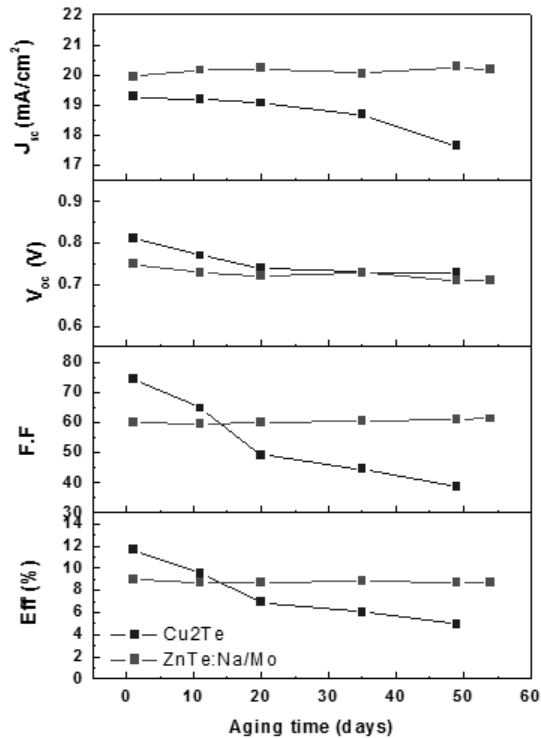


Fig. 8. Efficiency variation with various aging time and temperature using 10wt% Na<sub>2</sub>Te in ZnTe source



**Fig. 9.** Efficiency variation of CdTe solar cells using ZnTe:Na and Cu<sub>2</sub>Te back contact with various aging time

시간이 지남에 따라 효율이 감소하여 두 달이 지난 후에는 6% 정도의 효율을 나타내었다. 이와 비교하여 ZnTe:Na 후면전극을 사용한 경우에는 초기효율 9%로 Cu<sub>2</sub>Te와 비교하여 다소 낮은 효율을 보였지만 자연광에 두 달간 노출을 시켜도 효율이 감소하지 않는 매우 안정한 특성을 보이는 것을 관찰하였다. 이는 기본적으로 degradation의 원인으로 꼽히는 Cu의 확산을 Cu를 제거하고 이를 Na로 대체하면서 다음과 같은 결과를 가져온 것으로 보고있다. Na의 태양전지 내의 분포와 조성을 분석하여 이와 관련한 태양전지 특성을 추후 조사할 필요가 있지만 지금까지의 결과로 볼 때 Na는 cell degradation이 치명적인 영향을 미치지 않는 것으로 예상된다.

#### 4. 결론

기존의 Cu를 이용한 후면전극 형성 방법은 CdTe 표면의 ohmic contact 형성에 도움을 주어 초기의 높은 효율을 달성하는 데에 도움을 주었으나 Cu가 CdTe 내부를 통해 확산하여 CdS 까지 침투하여 축적되는 현상을 보였었다. CdS 내의 Cu는 deep level defect로 작용하여 빛이 입사하였을 때 빛의 손실을 가져오고 후면전극 부분의 Cu 농도 감소로 인한 직렬저항 증가, CdTe/CdS 계면의 recombination 증가로 인한 효율 저하 등 안정성 부분에 있어서 단점이 많은 것으로 지적되었다.

본 연구에서는 이런 안정성을 저해하는 요소인 Cu를 제거하

고 이를 대체할 수 있는 물질로 Na를 제안하였다. CdTe의 compensation 특성으로 인해 직접 doping이 힘들기 때문에 후면전극인 ZnTe를 제안하여 Na dopant를 이용하여 CdTe와 ZnTe:Na 간의 contact을 형성하고자 하였다.

ZnTe:Na 후면전극을 진공증발법으로 증착하여 6~10% 정도의 효율을 가지는 태양전지를 제조할 수 있었다. Mo/ZnTe:Na의 전극을 제안하여 태양전지를 제조한 결과 CdCl<sub>2</sub> treatment와 ZnTe:Na 전극의 증착의 전후 관계에 의해 태양전지의 특성과 안정성이 달라지는 것을 확인하였고 이는 PL 에서 볼 수 있듯이 이는 defect site와 연관이 있는 것으로 생각되었다. 그 중 Mo/ZnTe:Na/CdCl<sub>2</sub>/CdTe/CdS/ITO 의 구조를 사용한 경우 초기 효율 9%, 0.75V의 Voc를 보였고 두 달 정도의 자연광 상태의 노출에도 효율이 변하지 않는 높은 안정성을 가지는 특성을 관찰하였다. Na의 함량 변화 등의 추후의 실험 등을 통해 초기 효율의 향상을 가져올 것으로 기대하고 있고 고효율, 고안정성을 동시에 확보하는 CdTe 태양전지 제조 기술을 확보할 수 있을 것으로 생각한다.

#### Acknowledgments

This work was supported by the Center for inorganic Photovoltaic Materials (No. 2012-0001167) and the Priority Research Center program (2011-00031407) funded by Korean Government.

#### References

1. A. L. Fahrenbruch. and R. H. Bube, "Fundamentals of solar cells", New York, Academic Press.
2. P. V. Meyers, "Design of a thin film CdTe solar cell", Solar cells, Vol. 23, p.59-67, 1988.
3. J. Britt and C. Ferekides, Thin-film CdS/CdTe solar cell with 15.8% efficiency, Applied physics letter, Vol.62 (22), pp. 2851-2852, 1993.
4. T. Takamoto, T. Agui, H. Kurita and M. Ohmori, "Improved junction procedure for low temperature deposited CdS/CdTe solar cells", Solar Energy Materials and Solar cells, Vol.49, p.219-225, 1997.
5. X. Wu, "High-efficiency polycrystalline CdTe thin-film solar cells", Solar energy Vol.77, p.803-814, 2004.
6. J. Ma, D. Kuciauskas, D. Albin, R. Bhattacharya, M. Reese, T. Barnes, J. V. Li, T. Gessert and S. H. Wei, Dependence of the minority-carrier lifetime on the stoichiometry of CdTe using time-resolved photoluminescence and first principles calculations, "Physical review letters", Vol. 111, p.067402-1-067402-5, 2013.

7. B. E. McCandless, Y. Qu and R. W. Birkmire, "A treatment to allow contacting CdTe with different conductors", 1<sup>st</sup> WCPEC, p.107-110, IEEE, 1994.
8. J. H. Yun, K. H. Kim, D. Y. Lee and B. T. Ahn, "Back contact formation using Cu<sub>2</sub>Te as a Cu-doping source and as an electrode in CdTe solar cells", Solar energy materials and solar cells, Vol.75, p.203-210, 2003.
9. J. H. Yun, E. S. Cha, B. T. Ahn, H. S. Kwon and E. A. Al-Ammar, "Performance improvement in CdTe solar cells by modifying the CdS/CdTe interface with a Cd treatment", Current applied physics, Vol.14, p.630-635, 2014.
10. B. T. Ahn, J. H. Yun, E. S. Cha and K. C. Park, "Understanding the junction degradation mechanism in CdS/CdTe solar cells using a Cd-deficient CdTe layer, Current applied physics, Vol.12, p.174-178, 2012.
11. S. Demtsu and J. Sites and D. Albin, "Role of Copper in the performance of CdS/CdTe solar cells", 4<sup>th</sup> WCPEC, IEEE, 2006.
12. K. C. Park, E. S. Cha and B. T. Ahn, "Sodium-doping of ZnTe film by close-spaced sublimation for back contact of CdTe solar cell", Current applied physics, Vol. 11, p.S109-S112, 2011.
13. G. Y. Chung and B. T. Ahn, "Electrical properties of CdTe films prepared by close-spaced sublimation with screen-printed source layers", Journal of Applied physics, Vol.78, p. 5493-5498, 1995.