

RESEARCH

## 페로브스카이트 태양 전지의 수명 안정성 향상을 위한 $\text{Alq}_3/\text{MgF}_2$ 다층 봉지 박막

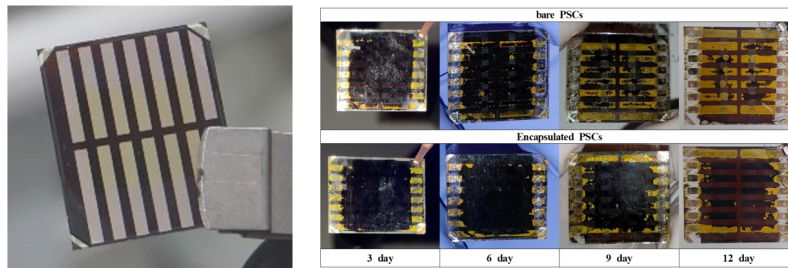
양진규<sup>†</sup>, 윤범희<sup>†</sup>, 곽호균, 전재우, 윤종문, 송승훈, 이현호<sup>\*</sup>

광운대학교 전자공학과

### $\text{Alq}_3/\text{MgF}_2$ Multilayered Encapsulation Film for Enhanced Stability of Perovskite Solar Cells

Jin-Gyu Yang<sup>†</sup>, Beomhee Yoon<sup>†</sup>, Ho-Gyun Kwak, Jae-Woo Jun, Jong-Mun Yun,  
Seung-Hoon Song, Hyunho Lee<sup>\*</sup>

Department of Electronic Engineering, Kwangwoon University, Seoul, Korea



#### ABSTRACT

Environmental factors such as oxygen and moisture are known to severely degrade perovskite solar cells (PSCs). In general, rigid glasses and resins are used to prevent moisture penetration. However, typical encapsulation exhibits the disadvantage of being vulnerable to external physical impact. In this study, to minimize device degradation from environmental factors, we present the organic/inorganic multilayered encapsulation film (MEF) that can effectively block moisture and oxygens. Tris (8-hydroxy-quinolinato) aluminum ( $\text{Alq}_3$ ) and magnesium fluoride ( $\text{MgF}_2$ ) were used as an organic and inorganic layer in the MEF structure, respectively. The optimal condition for effective encapsulation exhibits the 5 pairs of  $\text{Alq}_3/\text{MgF}_2$  structure and the water vapor transmission rate (WVTR) of the MEF is measured about  $0.2635 \text{ g/m}^2$  per day. The PSCs integrated with MEF show remarkable moisture barrier performance compared to the PSC without MEF (bare PSCs). After 12 days of degradation, the PSCs with MEF shows 40% degradation in terms of a power conversion efficiency (PCE), while the degradation rate of PCE of the bare PSCs shows 72.7% loss in PCE. Moreover, the change of the perovskite film absorbance under the film degradation provides the superior encapsulation characteristics of MEF. By investigating the changes in the photovoltaic parameters and water vapor transmission rate of MEF, we confirm that the moisture barrier performance of the MEF improved the stability of PSCs.

Key Words: Multilayered encapsulation film (MEF), Perovskite solar cells (PSCs), Stability, Water vapor transmission rate (WVTR)

\*Correspondence: [hyunho@kw.ac.kr](mailto:hyunho@kw.ac.kr)

<sup>†</sup>These authors contributed equally to this work.



## 1. 서론

페로브스카이트는 유기 양이온과 금속 양이온 그리고 할로젠 음이온이 각각 1:1:3 비율로 육면체 또는 팔면체의 격자 구조를 가진다. 또한, 구성 성분과 구조 변화에 따라 광 전기적 특성이 달라지기 때문에 다양한 분야에 적용할 수 있다[1].

Perovskite solar cells(PSCs)은 페로브스카이트 물질로 구성된 광 활성층을 사용하는 태양 전지를 의미한다. 페로브스카이트는 특정 파장의 빛을 받아 표면에 존재하는 자유 전자들의 집단적 공명을 유도하여 전자의 흐름을 증폭시킬 수 있다. 즉, 빛을 흡수하면 하나 이상의 전자-정공 쌍을 생성하게 된다. 이는 나노 단위의 금속에서 발생하는 현상인 국소 표면 플라즈몬 공명(localized surface plasmon resonance, LSPR)에 기인한 결과이다[2]. 또한, 페로브스카이트 물질은 캐리어 수명이 상대적으로 길어 태양 전지에서 에너지의 전달 매개체인 전자와 정공의 손실이 적다. 따라서 PSCs는 보다 높은 광전 효율(photoelectric efficiency)을 갖는다[3]. 게다가 용액 공정을 적용할 수 있고, 400°C 이하의 공정 온도를 가지고 있기 때문에 기존 실리콘 태양 전지보다 생산비용이 3~8배 저렴한 것으로 알려져 있다[4]. 결과적으로 이러한 강점들은 PSCs가 기존의 실리콘 태양 전지를 대체할 차세대 태양 전지로 주목받게 하는 이유가 되었다. 하지만, PSCs의 수명 안정성에 대한 연구는 아직 부족한 상태다. 외부 환경의 다양한 요인들은 PSCs의 수명 안정성을 감소시킬 수 있다. 그 중에서 수분과 산소는 광활성층에 쓰이는 페로브스카이트를 가수 분해하여 내부 구조를 변화시킨다. 이는 결과적으로 PSCs의 전기적 특성을 변화시켜 소자의 열화를 초래한다[5]. 따라서 이러한 현상을 방지하고자, PSCs와 같은 나노 구조를 갖는 소자들은 일반적으로 밀봉하는 봉지(encapsulation) 공정을 거치게 된다[6]. 이를 통해 소자의 내부를 외부환경과 완전히 차

단시켜 소자의 열화 요인들의 침투를 막는다.

봉지를 하기 위해 일반적으로 사용하는 방식은 글라스 봉지(rigid glass encapsulation)이며, epoxy resin과 같은 접착 물질을 통해 유리판(rigid glass)을 접합하여 진행된다. 이는 우수한 수분 차단 성능과 간단한 공정을 장점으로 한다. 하지만 이러한 방식은 epoxy resin의 안정성이 감소할 경우, 유리의 수분 투과 성능과 관계없이 외부의 수분과 산소가 측면으로 침투할 수 있으며, 유리를 사용하기 때문에 외부의 물리적 충격에 약하다는 단점이 존재한다[7].

본 연구에서는 이를 개선하기 위해 유기 박막과 무기 박막을 교차 배치한 organic/inorganic multilayered encapsulation film(MEF)을 PSCs에 적용하였다[9].

현재 봉지(encapsulation) 공정은 일반적으로 plasma enhanced chemical vapor deposition(PECVD)나 atomic layer deposition(ALD)를 주로 사용하여 진행된다. 이러한 증착 방식은 단차 도포성이 매우 뛰어나며 미세 면지에 의한 오염이 적기 때문에 높은 품질의 박막 제작이 가능하다[9,10]. 하지만 이러한 방법은 추가적인 공정 설비가 필요하며 공정에 소요되는 시간이 많기 때문에 박막 제작에 많은 비용이 소모된다. 따라서 본 연구에서는 간단한 증착 조건과 빠른 증착 속도를 장점으로 하는 진공 열 증착(vacuum thermal evaporation)을 봉지 층 공정에 도입했다. 이와 함께, 유기 무기 박막 교차를 통한 수분, 산소 침투 저해를 유도한다.

## 2. 연구 방법

### 2.1. Materials

PEDOT:PSS(Al4083)은 Heraeus에서 구매하였다. Methylammonium iodide(MAI 99.5%)는 Xian Polymer Light Technology에서 구매하였다. Lead iodide(PbI<sub>2</sub>, 99.9985%)는 Alfa Aesar에서 구매하였다. Tris(8-hydroxyquinolato)aluminum(Alq<sub>3</sub>)은 OSM에서 구매하였



다. Magnesium Fluoride( $MgF_2$ )는 Sigma Aldrich에서 구매하였다. PCBM은 1-Material에서 구매하였다. Polyethylenimine(PEI), dimethylformamide(DMF), dimethyl sulfoxide(DMSO), isopropyl alcohol(IPA), and chlorobenzene(CB)은 Sigma-Aldrich에서 구매하였다. 모든 물질은 정제과정(purification) 없이 사용하였다.

## 2.2. Fabrication of PSC

ITO 패터닝 유리 기판을 아세톤, Isopropyl alcohol (IPA), DI water에 순차적으로 세척한다. 세척한 기판은 UV ozone으로 15분간 표면처리(treat)를 한다. PEDOT:PSS 용액을 스핀 코팅(spin coating, 30 sec, 3,500 rpm)하고 Hot plate에서 열처리(annealing)(20 min, 130°C)한다. 그 후 페로브스카이트 층을 형성하기 위해 질소( $N_2$ ) 가스로 채워져 있는 글러브 박스(glove box)로 이동시킨다. 페로브스카이트 층은 Two-step method를 사용하여 제작하였다. DMF/DMSO (9:1)를 용매로 사용하는 1.3M  $PbI_2$  용액은 하루 동안 70°C에서 열처리와 교반(stirring) 과정을 거친다. 60 mg/mL의 MAI 용액은 MAI를 IPA에 녹여 준비한다. 두 용액은 사용하기 전 PVDF045 필터를 사용하여 여과(filtering)한다. PEDOT:PS가 올라간 기판 위에  $PbI_2$ 를 스핀 코팅(30 sec, 3,000 rpm)한 뒤 3분 동안 건조(dry)시키고, MAI를 스핀 코팅(30 sec, 3,000 rpm)하고 Hot plate에서 열처리(1 min, 70°C, 2 hour, 100°C)한다. 다음으로, PCBM을 스핀 코팅(30 sec, 2,000 rpm)하고 드라이박스(dry box)에서 하루 보관한다. PCBM이 올라간 기판은 다시 글러브 박스로 이동한 후, 1 mg/mL의 여과(PVDF, 045  $\mu m$ )를 해준 PEI를 스핀 코팅(30 s, 4,000 rpm)한다. 이후  $1.6 \times 10^{-6}$  Torr의 진공 조건에서 Ag 층(100 nm)을 열 증착했다.

## 2.3. Fabrication of MEF

$Alq_3$ 와  $MgF_2$  박막은 PSCs의 전극 위에  $1.4 \times 10^{-6}$

Torr의 진공 환경에서 각각 0.4 nm/s, 1 nm/s의 rate로 열 증착하였다.

## 2.4. Device Characterization

전류밀도-전압 곡선(J-V curves)은 300 W xenon lamp 기반 solar simulator(Newport 91160A)와 Keithley 237 source measurement unit under AM 1.5G 1-sun illumination( $100 \text{ mW/cm}^2$ )을 사용하여 측정하였다. 활성화 영역(active area)는  $0.02 \text{ cm}^2$ 이다. FE-SEM (Surface field-emission scanning electron microscopy)는 Sirion을 사용하였다. water vapor transmission rate (WVTR) 측정은 Mocon(USA)사의 Permatran-W 3/33 MA를 사용하였다.

# 3. 결과 및 고찰

## 3.1. Measurement of WVTR of MEF

유기/무기(organic/inorganic) MEF에서 유기 층은 높은 열 안정성을 갖는 Tris(8-hydroxyquinolato) aluminum ( $Alq_3$ )를 사용하였다[11]. 무기 물질은 120 nm~900 nm의 넓은 파장 영역에서 높은 투과율을 갖고 가시광선 영역에서 낮은 굴절률을 갖는 magnesium fluoride ( $MgF_2$ )를 사용하였다[12].

유기 물질 막과 무기 물질 막이 교차로 배치된 MEF에서 무기 막은 주요 보호막의 역할을 한다. 하지만 무기 물질의 특성상 표면 거칠기가 크고 물질의 표면에 다수의 크랙과 핀 홀이 존재하기 때문에 단일 막으로 사용할 시 높은 수분 차단 성능을 기대할 수 없다. [13] 이러한 문제를 해결하기 위해 MEF 구조에서는 무기 막 사이에 배치된 유기 막이 무기 막의 표면 거칠기를 낮춰주고, 크랙 사이로 침투하는 수분의 침투 경로를 길게 하여 높은 수분 방지 성능을 갖게 한다. 또한, 이러한 구조가 반복된 다층 구조는 MEF가 외부의 물리적 스트레스에 대해 강한 안정성을 갖을 수 있도



록 한다[14].

유/무기 MEF는 유기 막과 무기 막을 교차 배치한 구조를 갖음으로 박막 배치 수에 따라 수분 투과도 (water vapor transmission rate, WVTR) 성능 차이가 발생한다. 하지만, 단순히 박막 배치 층수를 늘리는 것은 봉지 된 PSCs의 공정 비용 및 시간 증가를 야기한다. MEF배치 층수에 따른 수분 투과도를 측정하기 위해 각각 30 nm의 두께를 갖는 단일 무기 층(30 nm), 1 pair(30/30 nm), 3 pair, 5 pair 총 4개의 MEF 박막을 비교하였다.

제작된 4개의 박막에 대한 수분 투과도 측정 결과는 Fig. 1(b)에 나타나 있다. MEF의 배치 층수가 증가함에 따라 수분 투과도가 점점 낮아지는 것을 확인 가능하다. 배치 층수가 5 pair가 될 때 수분 투과도 값의 유의미한 변화가 있어 PSCs에 적용할 MEF로 5 pair MEF를 도입하여 소자의 열화 정도를 분석했다.

### 3.2. Observation of PSC Degradation

PSCs의 수명 안정성에 있어서 MEF가 미치는 영향을 확인하기 위해, MEF의 유무에 따라 구분한 2개의 소자를 설정하였다. 소자의 구조는 Fig. 1(a)와 같다. 2개의 소자는 봉지 공정을 거친 PSCs with MEF

(Encap)와 공정을 거치지 않은 bare PSCs(Control)로 구성된다. 그리고 이들의 상태 변화를 시간에 따라 관찰함으로써 열화의 정도를 비교 관찰하였다. 소자를 제작한 직후부터 첫 측정까지의 시간을 제외하고, 실험 기간 동안 소자는 빛을 차단하여 실내의 상온에 보관되었다.

#### 3.2.1. Photoelectrical Degradation

MEF 적용 유무에 따른 PSCs의 시간에 따른 광 전기적인 특성 변화를 관찰하기 위해, 총 12일 동안 매일 동일한 시간대에 소자의 광 전기적 지표(단락 전류 밀도(short circuit current density,  $J_{sc}$ ), 개방 회로 전압(open circuit voltage,  $V_{oc}$ ), 곡선 인자(fill factor, FF), 전력 변환 효율(power conversion efficiency, PCE)를 측정하였다. 첫 측정은 소자를 제작한 직후 진행되었으며, 이후 소자를 보관한 장소의 온도와 습도는 Table 1에 정리되어 있다.

PSCs의 특성 측정은 international electro- technical commission(IEC)의 standard test condition(STC)를 준수하여 진행되었다[15].

Fig. 2와 Table 2는 MEF의 유무로 구분된 소자 (Encap, Control) 들의 시간에 따른 성능 변화를 정규

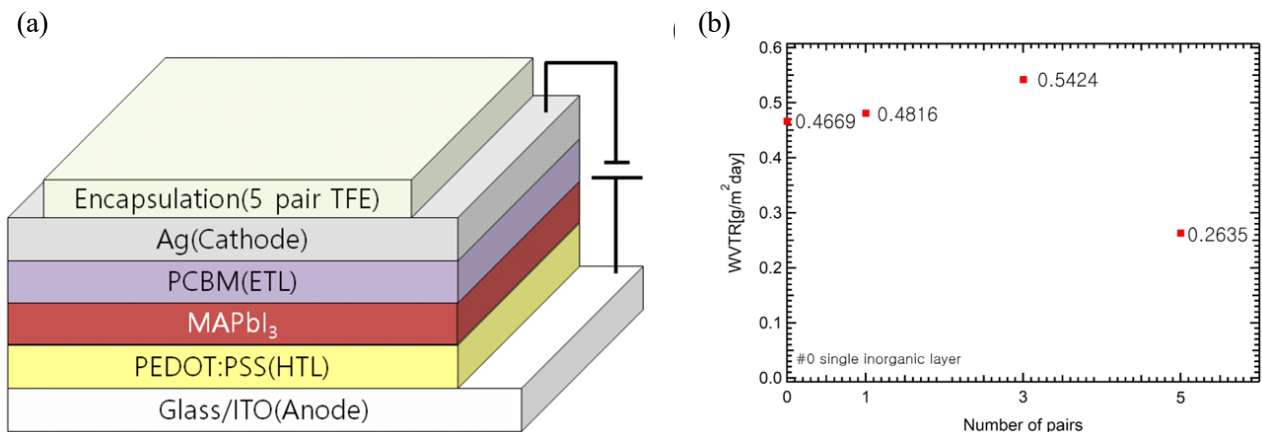
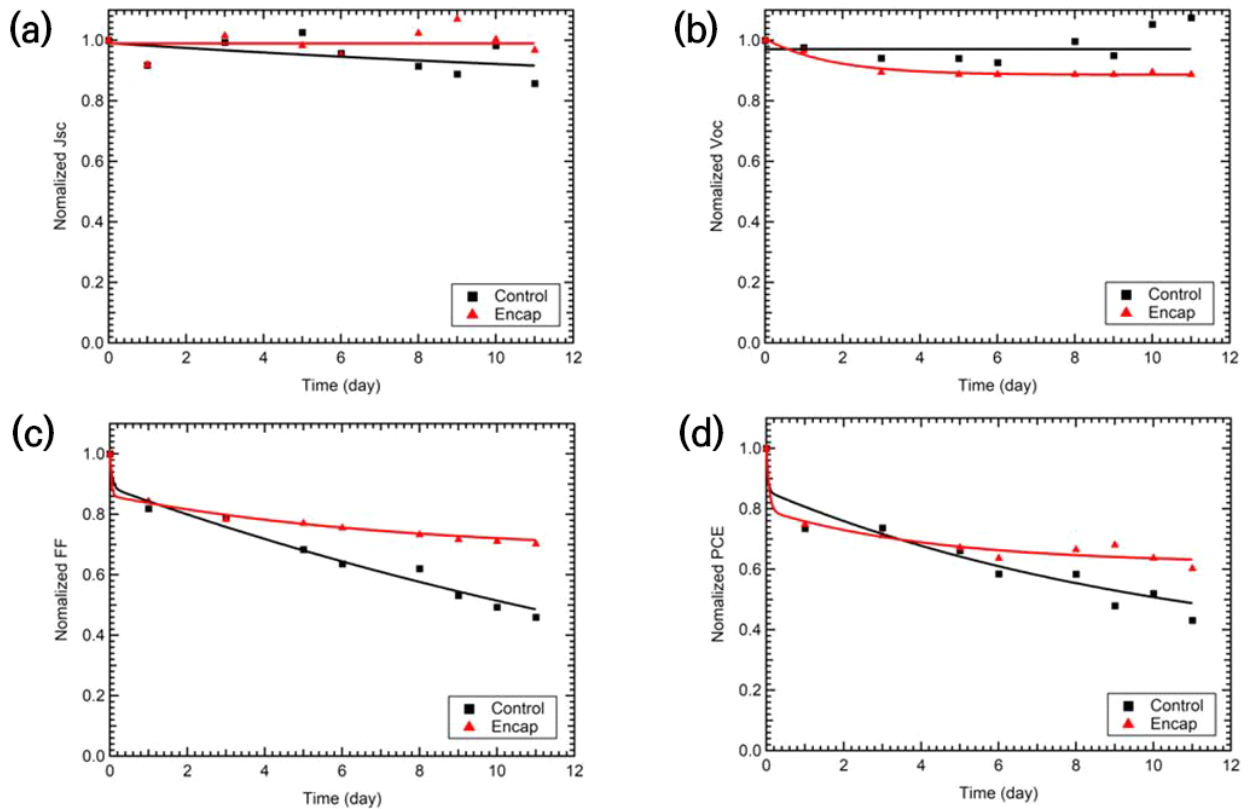


Fig. 1. (a) Device structure of PSCs, (b) WVTR (water vapor transmission rate) for each pair of MEF.



**Table 1.** Temperature and humidity during 12 days of degradation

Date	0 day	1 day	2 day	3 day	4 day	5 day	6 day	8 day	9 day	10 day	11 day
Temp. [°C]	20.6	20.6	20.6	20.3	21.9	20.3	20.7	20.6	21.1	20.8	20.9
Hum. [%]	55	55	60	58	46	54	65	60	46	48	57



**Fig. 2.** Normalized long-term degradation trends are presented for (a)  $J_{sc}$ , (b)  $V_{oc}$ , (c)  $FF$ , (d)  $PCE$ . Encap and Control represent the photovoltaic performance of PSCs with and without MEF, respectively. The solid line is a guide to the eye.

화 시켜 나타낸 그래프이다. Fig. 2(a)에서 봉지 공정을 거친 소자의 단락 전류 밀도는 측정 기간 내 큰 감소 없이 안정적으로 유지되었다. 하지만 Bare PSC(Control)의 단락 전류 밀도는 시간에 따라 일정하게 감소하였다. Fig. 2(b)에서 개방 회로 전압은 전체적으로 시간에 따라 일정하게 유지되는 경향성을 보였다. Fig. 2(c)는 PSCs의 곡선 인자를 나타낸 그래프이다. 곡선

인자는 Encap 소자에서는 소폭 감소하였지만, Control 소자에서는 시간에 따라 크게 감소하였다. Fig. 2(d)는 12일 간의 전력 변환 효율의 변화를 나타낸 그래프이다. 시간에 따라 Encap 소자의 전력 변환 효율은 초기 감소 후 유지되지만, Control 소자의 전력 변환 효율은 시간에 따라 지속적으로 감소하였다. MEF 처리를 한 소자(Encap)는 초기 측정 대비 전력 변환 효율이 40%



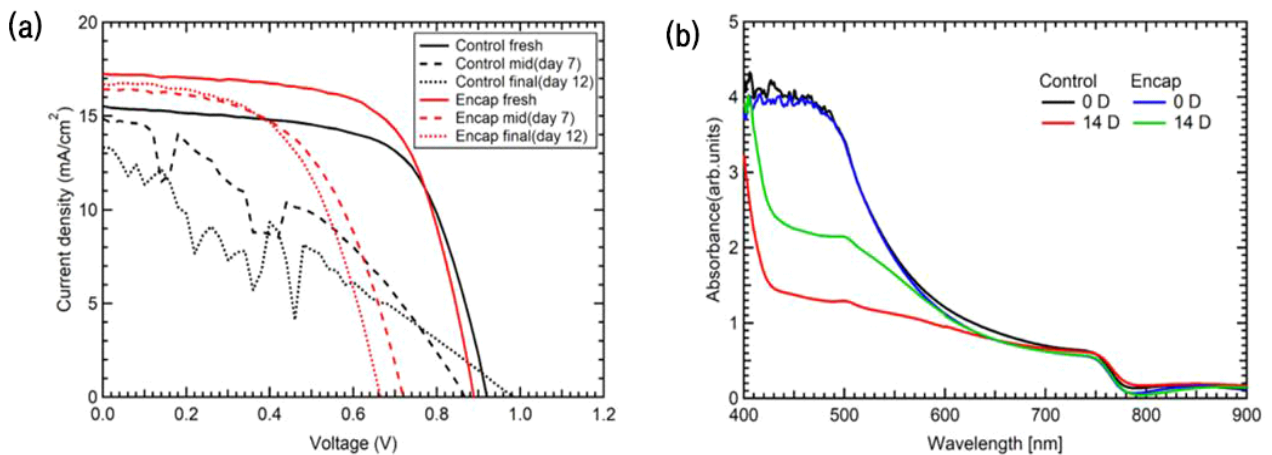
**Table 2.**  $J_{SC}$ ,  $V_{OC}$ ,  $FF$ ,  $PCE$  during 12 days of degradation

Date		0 day	1 day	3 day	5 day	6 day	8 day	9 day	10 day	11 day
$J_{SC}$ (mA/cm <sup>2</sup> )	Control	15.53	14.26	15.44	15.95	14.87	14.22	13.80	15.26	13.33
	Encap	17.26	15.87	17.53	16.96	16.41	17.67	18.47	17.31	16.70
$V_{OC}$ (V)	Control	9.21	8.99	8.67	8.66	8.53	9.18	8.75	9.70	9.90
	Encap	8.90	8.60	7.97	7.90	7.90	7.90	7.90	7.97	7.90
$FF$ (%)	Control	64.78	53.05	51.02	44.32	41.23	40.23	34.47	31.97	29.80
	Encap	65.55	55.27	51.33	50.50	49.51	48.00	46.99	46.57	46.02
$PCE$ (%)	Control	9.26	6.82	6.83	6.14	5.42	5.41	4.44	4.82	3.99
	Encap	10.07	7.54	7.17	6.77	6.42	6.70	6.86	6.42	6.07

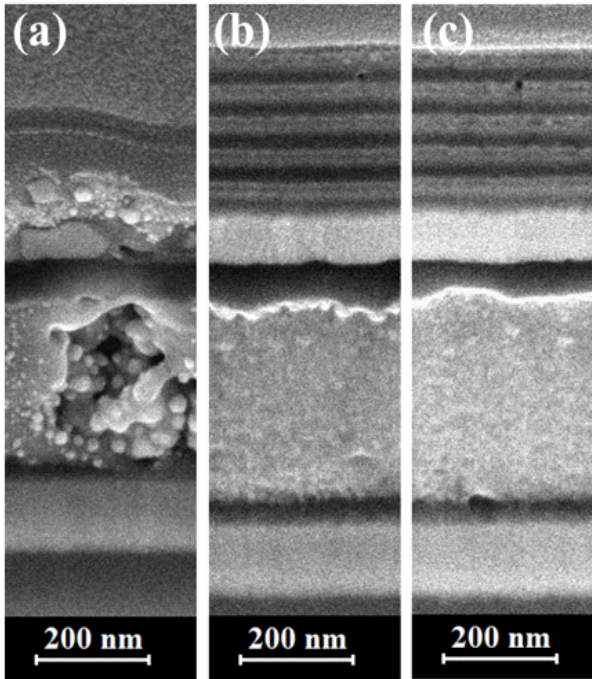
감소한 것에 비해, Control 소자의 전력 변환 효율은 72.7% 감소하였다. 열화에 따른 태양전지의 전기적 특성 변화는 Fig. 3(a)의 그래프를 통해서 다시 확인할 수 있다. Fig. 3(a)는 Encap과 Control 소자의 전류밀도-전압 곡선을 시간에 따라 초기(0 day), 중간(7 day), 마지막(12 day)로 구분하여 나타낸 그래프이다. 그래프에서 Encap 소자의 곡선은 시간에 따른 감소 경향이 존재하지만, 곡선의 형태가 마지막까지 초기의 안정적인 형태를 잃지 않으면서 유지한다. 그에 반해, Control 소자는 시간이 지날수록 초기의 형태를 찾아

볼 수 없을 정도로 변형되었다. 이 결과는 외부 환경의 수분과 산소에 노출된 PSCs의 내부 구조가 시간에 따라 열화되었음을 암시한다.

PSCs의 시간에 따른 전기적인 특성의 열화는 소자의 단면 구조를 관찰함으로써 확인할 수 있다. Fig. 4는 열화된 소자들의 단면을 주사 전자 현미경으로 촬영한 단면도다. Fig. 4(a)는 Bare PSCs(Control)의 12일 열화 후 이미지로, 페로브스카이트 층이 파괴된 것을 볼 수 있다. 이는 외부 환경요인(수분, 산소 등)에 의해 페로브스카이트 구조가 파괴된 것을 추측할 수 있으며,



**Fig. 3.** (a) J-V characteristic curve of PSC with MEF (Encap) & Bare PSC (Control) with time, (b) Absorbance spectrum of perovskite film with MEF (Encap) and Bare perovskite film (Control) at 0 day & 14 day.



**Fig. 4.** Cross-sectional SEM images. (a) Bare PSC (Control, 12 days degradation), (b) PSC with MEF (Encap, 12 days degradation), (c) PSC with MEF (fresh device).

열화 결과에 따라 페로브스카이트를 구성하는 할로젠 원소의 확산이 일어났음을 알 수 있다[5]. 소자를 구성하는 은 전극(Ag electrode)층은 확산된 할로젠 원소와의 큰 반응성을 토대로 요오드화 은(AgI) 등의 화합물을 결성해 구조적 변화를 일으킨 것을 알 수 있다. 따라서, 외부 환경요소로 인한 페로브스카이트의 열화로 인해 PSCs의 광 전기적 성능이 저하된다는 것을 알 수 있다. Fig. 4(b)는 12일 동안 열화를 거친 Encap 소자를 SEM으로 촬영한 단면도이다. 앞선 Control 소자와는 다르게 페로브스카이트 층이 형태를 유지하고 있으며 핀 홀도 생기지 않았다. Fig. 4(c)의 열화 전 Encap 소자의 단면과 비교해봐도 거의 변화가 없는 것을 알 수 있다. 따라서, MEF를 통한 봉지층이 페로브스카이트 태양전지의 열화를 효과적으로 막았음을 알 수 있다.

### 3.2.2. Absorbance Degradation of Perovskite

페로브스카이트 층의 구조적 열화는 페로브스카이트의 흡수에 영향을 미칠 것으로 예상된다. 광전효과 의 기반이 되는 빛의 흡수량의 변화는 소자 전력변환 효율 변화에 직접적인 영향을 미친다. Fig. 3(b)는 Encap과 Control 소자의 각각 제작 초기(0 day)와 열화 이후(14 day)의 광 흡수도 그래프이다. Encap 소자 (Glass/MAPbI<sub>3</sub>/MEF)와 Control 소자(Glass/MAPbI<sub>3</sub>)를 제작하여 시간에 따른 광 흡수도 열화를 비교 관찰하였다. 그래프에서 400~600 nm 파장 구간 내에서 초기 대비 광 흡수도는 Encap 소자가 35.1%, Control 소자가 62.3% 감소하였다. 따라서, 빛을 흡수하는 절대적인 양의 차이가 존재하며, 단락 전류 밀도 차이를 기반으로 전력변환효율에 영향을 끼치게 된다.

## 4. 결론

본 연구에서는 유리판 봉지 기법의 낮은 물리적인 내구성과 열화에 치명적인 구조적 문제를 개선하는 방안으로 유무기 다층 봉지막을 제시하였다. 또한, 진공 열 증착 방법(vacuum thermal evaporation)을 사용함으로써 공정 단가와 시간을 감축하였다.

우리가 제시한 Alq<sub>3</sub>/MgF<sub>2</sub> 5 pair MEF는 0.2635 g/m<sup>2</sup> per day의 낮은 수분 투과도(WVTR)를 보여주었다. MEF를 적용한 PSCs의 열화(12 days)에 따른 전력 변환 효율의 감소율은 40%로 Bare PSCs의 감소율인 72.7%보다 우수한 결과를 보였다. MEF의 효과는 열화 전후의 단면도와 페로브스카이트 층의 흡수도 변화를 통해 입증되었다. 우리는 본 연구를 통해 제시된 MEF가 PSCs의 수명안정성 향상에 대한 해결책으로 기여할 수 있을 것으로 기대한다.

## 기호설명

PSCs: Perovskite solar cells



Alq<sub>3</sub>: Tris(8-hydroxyquinolino)aluminium  
MgF<sub>2</sub>: Magnesium fluoride  
WVTR: Water vapor transmission rate  
MEF: Multilayered encapsulation film  
ITO: Indium Tin Oxide  
PEDOT: PSS: Poly(3,4-ethylenedioxythiophene): poly(styrenesul-fonate)  
SEM: Scanning electron microscopy

## ACKNOWLEDGEMENTS

### Author Contributions

BHY, JGY, HGK, JWJ, JMY, SHS were involved in experiments, analysis, and discussion. JGY, HGK drafted the manuscript. HL supervised overall project and edited final manuscript. All authors read and approved the final manuscript.

### Funding

This work was supported by the Basic Science Research Program (NRF-2022R1F1A1066526) through the National Research Foundation of the Ministry of Education, Republic of Korea. This research (for Hyunho Lee) was partially supported by Basic Science Research Program through the National Research Foundation of Korea (NRF) funded by the Ministry of Education (No. 2018R1A6A1A03025242).

### Declarations of Competing Interests

The authors declare that they have no competing interests.

## REFERENCES

[1] Jena, A. K.; Kulkarni, A.; Miyasaka, T. Halide

Perovskite Photovoltaics: Background, Status, and Future Prospects. *Chem. Rev.* 2019, 119, 3036-3103.

[2] Chen, H.; Shao, L.; Li, Q.; Wang, J. Gold Nanorods and Their Plasmonic Properties. *Chem. Soc. Rev.* 2013, 42, 2679-2724.

[3] Stranks, S. D.; Eperon, G. E.; Grancini, G.; Menelaou, C.; Alcocer, M. J.; Leijtens, T.; Herz, L. M.; Petrozza, A.; Snaith, H. J. Electron-Hole Diffusion Lengths Exceeding 1 Micrometer in an Organometal Trihalide Perovskite Absorber. *Science.* 2013, 342, 341-344.

[4] Qiu, L.; Ono, L.; Qi, Y. Advances and Challenges to the Commercialization of Organic-Inorganic Halide Perovskite Solar Cell Technology. *Mater. Today Energy.* 2017, 7, 169-189.

[5] Boyd, C. C.; Cheacharoen, R.; Leijtens, T.; McGehee, M. D. Understanding Degradation Mechanisms and Improving Stability of Perovskite Photovoltaics. *Chem. Rev.* 2019, 119, 3418-3451.

[6] Ahmad, J.; Bazaka, K.; Anderson, L. J.; White, R. D.; Jacob, M. V. Materials and Methods for Encapsulation of OPV: A Review. *Renew. Sust. Energ. Rev.* 2013, 27, 104-117.

[7] Han, Y.; Meyer, S.; Dkhissi, Y.; Weber, K.; Pringle, J. M.; Bach, U.; Spiccia, L.; Cheng, Y. B. Degradation Observations of Encapsulated Planar CH<sub>3</sub>NH<sub>3</sub>PbI<sub>3</sub> Perovskite Solar Cells at High Temperatures and Humidity. *J. Mater. Chem. A.* 2015, 3, 8139-8147.

[8] Ghosh, A. P.; Gerenser, A. L. J.; Jarman, C. M.; Fornalik, J. E. Thin-Film Encapsulation of Organic Light-Emitting Devices. *Appl. Phys. Lett.* 2005, 86, 223503.





- [9] Geroge, S. M. Atomic Layer Deposition: An Overview. *Chem. Rev.* 2010, 110, 111-131.
- [10] Wuu, D. S.; Chen, T. N.; Chiang, C. C.; Chen, Y. P.; Horng, R. H.; Juang, F. S. Transparent Barrier Coatings for Flexible Organic Light-Emitting Diode Applications. *Chem. Vap. Depos.* 2006, 12, 220-224.
- [11] Colle, M.; Brutting, W. Thermal, Structural and Photophysical Properties of the Organic Semiconductor Alq<sub>3</sub>. *Phys. Status Solidi (a)*. 2004, 201, 1095-1115.
- [12] Yang, H. H.; Park, G. C. A Study on the Properties of MgF<sub>2</sub> Antireflection Film for Solar Cells. *Trans. Electr. Electron. Mater.* 2010, 11, 33-36.
- [13] Fumagalli, L.; Binda, M.; Lopez, I. S.; Natali, D.; Sampietro, M.; Ferrari, S.; Lamagna, L.; Fanciulli, M. Multi Layer Structure for Encapsulation of Organic Transistors. *Org. Electron.* 2009, 10, 692-695.
- [14] Grego, S.; Lewis, J.; Vick, E.; Temple, D. Development and Evaluation of Bend-Testing Techniques for Flexible-Display Applications. *J. Soc. Inf. Disp.* 2005, 13, 575-581.
- [15] Ahn, S. K.; Shin, K. S.; Yoon, K. H. Performance Evaluation Technique for Solar Cells (measurement and Correction). *Polym. Sci. Technol.* 2011, 22, 570-576.